



**Universidade do Porto**

**FEUP** Faculdade de Engenharia

**Análise do Comportamento Dinâmico de Estruturas  
Constituídas por Espumas Metálicas**

Paulo Jorge Santos Nunes

Up201607689

Orientador:

Renato Manuel Natal Jorge

Co-Orientador:

Marco Paulo Lage Parente

Dissertação para grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Porto, 2018



*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas  
pensar o que ainda ninguém pensou sobre o que todo  
mundo vê.”*

*Arthur Schopenhauer*



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e ao quais estarei eternamente grato.

Começo por agradecer de uma forma muito especial, ao mentor deste trabalho o meu orientador, o Professor Doutor Renato Natal Jorge por todo o apoio, pela disponibilidade proporcionada, pela total colaboração no solucionar de duvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho, mas acima de tudo, pela oportunidade que me deu de realizar este trabalho numa área com bastante interesse para a sociedade.

De seguida agradeço também, ao co-orientador pelo programa fornecido, pela ajuda nas simulações numéricas e pela sua disponibilidade apresentada ao longo do semestre.

Não posso deixar de agradecer, ao professor Bruno Areias também pela disponibilidade exibida ao longo do semestre, mas principalmente, pela ajuda no programa “ABAQUS”, a sua ajuda foi crucial para o desenvolver desta tese.

Em especial queria agradecer à Marta Brito, pelos fins de semana perdidos em casa, durante a realização da tese e pela força que me deu ao longo de toda esta caminhada.

Por fim e não menos importante, agradecer aos meus pais e irmão, que sempre me apoiaram e por, naqueles momentos em que nem eu tinha certeza de nada, tinham sempre uma palavra de incentivo e força para me dar. A todos aqueles que me ajudaram de forma direta e indireta e não estão aqui referidos, deixo também uma palavra de apreço e gratidão pela ajuda, pois sem vocês não era possível a realização desta tese.

Paulo Nunes (Porto, 2018)



## RESUMO

As estruturas sandwich surgem no sentido de melhorar as propriedades mecânicas, uma vez que a combinação de materiais oferece propriedades à estrutura final quase sempre melhores que as dos materiais constituintes. Deste modo, estes tipos de estruturas podem ser bastante importantes em aplicações de elevada resistência mecânica.

A estrutura sandwich estudada ao longo desta tese é composta por faces de chapa de alumínio e núcleo em espuma metálica. As chapas de alumínio são responsáveis pela rigidez da estrutura sandwich, sendo que, a própria rigidez do alumínio é melhorada devido ao afastamento provocado pela introdução de um núcleo. A espuma metálica é incumbida de fornecer à estrutura propriedades, que a caracterizam, tais como: baixa densidade e elevada absorção de energia. Esta junção de materiais permite a criação de uma estrutura ideal para componentes sujeitos a impactos de grande exigência mecânica.

Devido às excelentes propriedades referidas anteriormente, estas estruturas têm sido estudadas, no sentido de serem aplicadas na indústria dos transportes. A leveza e a resistência das estruturas sandwich fazem destas uma opção bastante ambicionada para painéis traseiros e dianteiros de um automóvel, uma vez que são componentes críticos numa colisão. Com intuito de estudar estas condições procedemos a uma análise do comportamento dinâmico das estruturas sandwiches, com núcleos de espumas metálicas. Este trabalho vem no seguimento de estudos previamente efetuados pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.





## **ABSTRACT**

The sandwich structures arise in the sense of improving the mechanical properties, since the combination of materials offers properties to the final structure almost always better than those of the constituent materials. Thus, these types of structures can be quite important in applications of high mechanical strength.

The sandwich structure studied throughout this thesis is composed of aluminum plate faces and metal foam core. Aluminum sheets are responsible for the rigidity of the sandwich structure, and the rigidity of aluminum itself is improved due to the spacing caused by the introduction of a core. The metallic foam is responsible for providing the structure with properties which characterize it, such as: low density and high energy absorption. This joining of materials allows the creation of an ideal structure for components subject to impacts of great mechanical exigency.

Due to the excellent properties previously mentioned, these structures have been studied in the sense of being applied in the transport industry. The lightness and toughness of these structures make them a well-liked option for the rear and front panels of a car, since they are critical components in a collision. In order to study these conditions we proceed to an analysis of the dynamic behavior of the sandwich structures, with metallic foam cores. This work follows the previous studies carried out by the Department of Mechanical Engineering of the Faculty of Engineering of the University of Porto.



# ÍNDICE

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	ix
Índice .....	xi
Lista de figuras .....	xiv
Lista de tabelas .....	xvii
Nomenclatura .....	xviii
Capítulo 1 .....	1
1    Introdução.....	1
1.1    Nota Introdutória.....	1
1.2    Apresentação e objetivos da tese .....	2
1.3    Organização da tese .....	3
Capítulo 2.....	5
2    Estado da Arte .....	5
2.1    Desenvolvimento histórico .....	5
2.2    Estruturas sandwich .....	7
2.2.1    Núcleo.....	9
2.2.2    Faces .....	10
2.2.3    Adesivo.....	11
2.2.4    Comportamento Estrutural .....	12
2.3    Estrutura da espuma do núcleo .....	15
2.3.1    Espumas metálicas de célula aberta .....	16
2.3.2    Espumas metálicas de células fechadas.....	16
2.3.3    Processo de fabrico da espuma.....	17
2.3.4    Aplicações .....	26
2.4    Estrutura da chapa das faces .....	29

2.4.1	Processo de fabrico .....	29
2.4.2	Aplicações .....	30
Capítulo 3	.....	35
3	Propriedades mecânicas da face e do núcleo.....	35
3.1	Características mecânicas da chapa das faces.....	35
3.1.1	Tração Uniaxial da Chapa das Faces .....	36
3.1.2	Modelo Elastoplástico das Faces .....	39
3.1.3	Função de cedência.....	44
3.1.4	Critério de Cedência de Von Mises .....	46
3.1.5	Regra do Encruamento .....	47
3.1.6	Anisotropia das Ligas de Alumínio .....	50
3.2	Características Mecânicas da Espuma do Núcleo.....	57
3.2.1	Densidade da Espuma.....	59
3.2.2	Propriedades Mecânicas da Espuma .....	59
3.2.3	Anisotropia das Espumas Metálicas .....	67
3.2.4	Propriedades de Absorção de Energia da Espuma .....	67
3.2.5	Modelo Elastoplástico do Núcleo.....	69
3.2.6	Critério de Cedência .....	70
3.2.7	Definição da Superfície de Cedência .....	71
3.2.8	Modelo de Deshpande .....	72
3.3	Propriedades para simulações numéricas .....	77
3.3.1	Propriedades das chapas de alumínio .....	77
3.3.2	Propriedades da espuma de alumínio .....	79
Capítulo 4	.....	85
4	Influência dos elementos e da malha.....	85
4.1	Análise dos elementos e da malha .....	85
4.1.1	Elementos .....	86

4.1.2	Tipo de malha .....	87
4.1.3	Resultados.....	89
4.2	Diferença do rácio de rigidez/peso entre a estrutura sandwich e o alumínio	92
Capítulo 5	.....	95
5	Reprodução do Ensaio experimental .....	95
5.1	Ensaio UCB .....	95
5.2	Resultados.....	100
Capítulo 6	.....	105
6	Aplicação da estrutura sandwich a um componente automóvel.....	105
6.1	Estrutura sandwich na lateral de um automóvel .....	105
6.2	Diferença do rácio de rigidez/peso entre a estrutura sandwich e o aço ..	110
Capítulo 7	.....	113
7	Conclusões e trabalhos futuros .....	113
7.1	Conclusões .....	113
7.2	Trabalhos Futuros .....	115

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Amostra da estrutura sandwich a estudar [1].	2
Figura 2.1 - Disposição de uma estrutura sandwich [9].	8
Figura 2.2 - Influência da espessura nas características mecânicas [16]	8
Figura 2.3 - Tipos de materiais utilizados para núcleos [17-19].	10
Figura 2.4 - Tipo de materiais utilizados para faces de estruturas sandwich [20,21]	11
Figura 2.5 - Tipos de falhas no adesivo [13].	12
Figura 2.6 - Espuma metálica de célula aberta [26, 6].	16
Figura 2.7 - Estrutura celular - espumas de célula fechada [27, 9].	17
Figura 2.8 - Processos de fabrico da espuma metálica [24].	18
Figura 2.9 - Processo de fabrico de insuflação de ar através de uma liga metálica no estado líquido [24].	19
Figura 2.10 - Estrutura obtida pelo processo de fabrico de insuflação de ar através de uma liga metálica no estado líquido [6].	20
Figura 2.11 - Processo de fabrico de espuma metálica, mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão e no arrefecimento [24].	21
Figura 2.12 - Estrutura obtida pelo processo de espuma metálica, mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão e no arrefecimento [6].	22
Figura 2.13 - Processo de fabrico de espuma metálica consolidação de um pó metálico com um agente que promove a formação de espuma, seguindo de aquecimento para ativar o reagente [24].	23
Figura 2.14 - Forma final da espuma através do processo de fabrico consolidação de um pó metálico com um agente que promove a formação de espuma, seguindo de aquecimento para ativar o reagente [6].	24
Figura 2.15 - Processo de fabrico de espumas metálicas "Investment casting" [24].	25
Figura 2.16 - Forma da espuma obtida pelo processo "Investment casting" [6].	26
Figura 2.17 - Exemplos de aplicações na aeronáutica e aeroespacial [6].	26
Figura 2.18 - Depósito de nitrogénio para aviação.	27
Figura 2.19 - Exemplos de aplicações estruturais [9].	27
Figura 2.20 - Exemplos de aplicações na área de transferência de calor [6, 24].	28

Figura 2.21 - Exemplo de funções e aplicações que se pode dar as espumas metálicas [16].....	29
Figura 2.22 - Processo de laminagem [29].....	30
Figura 2.23 - Exemplo de embalagens e utensilio de cozinha de alumínio [30]. ....	31
Figura 2.24 - Fuselagem de uma aeronave em alumínio [16].....	31
Figura 2.25 - Carroçaria de um automóvel em alumínio [31].....	32
Figura 2.26 - Exemplo da utilização do alumínio na construção civil [3]. ....	32
Figura 3.1 - Faces em chapa de alumínio da estrutura sandwich [1]. ....	35
Figura 3.2 - Estrutura material da chapa [1]. ....	36
Figura 3.3 - Gráfico tensão-deformação de uma liga metálica [3]. ....	37
Figura 3.4 - Gráfico de tensão-deformação de uma liga metálica com patamar de cedência [2].....	37
Figura 3.5 - Gráfico tensão-deformação com descarregamento e carregamento [3].	38
Figura 3.6 - Comportamento elastoplástico - modelo elastoplástico com endurecimento [3].....	39
Figura 3.7 - Modelo reológico elastoplástico [2].....	40
Figura 3.8 - Lei da decomposição [3]. ....	41
Figura 3.9 - Condição de ortogonalidade no espaço das tensões $\sigma_1$ - $\sigma_2$ [3]. ....	45
Figura 3.10 - Representação das superfícies dos critérios de Tresca e de Von Mises [2].....	46
Figura 3.11 - a) Encruamento isotrópico; b) Encruamento cinemático [3].....	49
Figura 3.12 - Direções principais de um provete de tração para o cálculo dos coeficientes $r$ [1]. ....	50
Figura 3.13 - Referencial usado para uma chapa para definição de diferentes ângulos $\alpha$ . ....	51
Figura 3.14 - Sistema de coordenadas - chapa laminada [1].....	52
Figura 3.15 - Núcleo em espuma de metálica da estrutura sandwich [1]. ....	58
Figura 3.16 - Estrutura material da espuma do tipo; a) Cymat com uma densidade relativa de 0,04; b) Alporas com uma densidade relativa de 0,09; c) Alulight com uma densidade relativa 0,25 [15].....	58
Figura 3.17 - Variabilidade do módulo de Young com a densidade para diferentes espumas [15]. ....	60
Figura 3.18 - Curva típica à compressão para espumas metálicas [15]. ....	61

Figura 3.19 - Mecanismos de deformação à compressão, células abertas a),b) e c), célula fechada d), e) e f) [15, 17-18].....	63
Figura 3.20 - Curva típica à tração para espumas metálicas [15]. ....	64
Figura 3.21 - Mecanismo de deformação à tração, células abertas a), b) e c), célula fechada d) e e) [15, 18-19].....	65
Figura 3.22 - Modelação para as células abertas Ashby e Gibson [16] – compressão. ....	66
Figura 3.23 - Modelação para as células fechadas Ashby e Gibson [16] - compressão. ....	67
Figura 3.24 - Representação esquemática de um Absorisor real versus Absorisor ideal [19].....	68
Figura 3.25 - Curvas de compressão de espumas de alumínio para diferentes densidades [21]. ....	69
Figura 3.26 - Definição da superfície de cedência do modelo Deshpande [22]. ....	72
Figura 3.27 - Resultados da definição da superfície de cedência do modelo de Deshpande [22]. ....	72
Figura 3.28 - Superfície de cedência do modelo de Deshpande em referencial p, q [22].....	73
Figura 3.29 - Formas de escoamento: a) associado; b) não associado [3]. ....	75
Figura 3.30 -Modelação numérica ensaio de tração – chapa [1].....	77
Figura 3.31 - Pontos tensão real - de formação real.....	79
Figura 3.32 - Curva tensão - deformação usada na modelação numérica – Espuma [1]. ....	80
Figura 4.1 - Exercício prático.....	86
Figura 4.2 - Elemento C3D8 [2]. ....	87
Figura 4.3 - Resultados para a malha 1 .....	89
Figura 4.4 - Resultados malha 2.....	90
Figura 4.5 - Resultados para a malha 3 .....	90
Figura 4.6 - Evolução dos resultados para os elementos C3D8.....	91
Figura 4.7 - Deslocamentos da placa sandwich e placa de alumínio .....	93
Figura 5.1 - Exemplificação de um ensaio UCB.....	95
Figura 5.2 - Representação das condições fronteira.....	96
Figura 5.3 - Configuração do ensaio UCB e representação da malha .....	97
Figura 5.4 - Demonstração dos elementos coesivos. ....	98



Figura 5.5 - Comparação das propriedades do adesivo.....	99
Figura 5.6 - Comparação dos resultados numéricos com os experimentais [1].....	100
Figura 5.7 - Resultados do ensaio UCB. ....	101
Figura 5.8 - Resultados do ensaio UCB desprezando a parte final. ....	102
Figura 5.9 - Gráfico de absorção de energia na deformação plástica da espuma em função da descida do punção. ....	103
Figura 5.10- Solução do ensaio UCB, a) 1000 mm/s, b) 10000 mm/s, c) 27778 mm/s .....	103
Figura 6.1 - Zona do carro selecionada [3]. ....	105
Figura 6.2 – Exemplificação do impacto a provocar na lateral.....	106
Figura 6.3 - Condições fronteira da lateral.....	107
Figura 6.4 - Gráfico força versus deslocamento provocado pelo impacto do punção. .....	108
Figura 6.5 - Energia absorvida pela lateral do automóvel. ....	108
Figura 6.6 - Forma da lateral após o choque. ....	109
Figura 6.7 - Pontos tensão real-deformação real [4]. ....	111
Figura 6.8 – Gráfico de força versus deslocamento da lateral em sandwich e em aço. .....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de falhas [16] .....	13
Tabela 3.1 - Propriedades elásticas da chapa de alumínio EN 5754 [1].....	77
Tabela 3.2 - Propriedades da espuma metálica [1]. ....	81
Tabela 4.1 - Caracterização das malhas utilizadas.....	88
Tabela 4.2 - Cálculo do peso da placa sandwich. ....	93
Tabela 4.3 - Cálculo do peso da placa de alumínio.....	93
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos elementos coesivos .....	98
Tabela 6.1 - Propriedades plásticas do aço SAE 1020 [3]. ....	110

# NOMENCLATURA

## Lista de abreviaturas

**PUR** – Poliuretano

**PS** – Poliestireno

**UCB** – Unconstrained cylindrical Bending

## Lista de símbolos

$\rho$	Densidade
$\rho_s$	Densidade do material solido de base
$\bar{\rho}$	Densidade relativa
$\alpha$	Parâmetro interno do material
$r$	Coeficiente de anisotropia
$e$	Deformação real
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Tensor das tensões
$\boldsymbol{\varepsilon}^P$	Deformação plástica uniaxial
$\boldsymbol{\varepsilon}^e$	Deformação elástica uniaxial
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Deformação uniaxial
$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^P$	Deformação plástica efetiva
$\boldsymbol{\varepsilon}_D$	Deformação de densificação
$E$	Modulo Young
$\boldsymbol{\sigma}$	Tensor das tensões
$\boldsymbol{\sigma}_{Y0}$	Tensão de cedência
$\bar{\boldsymbol{\sigma}}$	Tensão efetiva / Von Mises
$S$	Tensor das tensões desviadoras
$\boldsymbol{\sigma}_c$	Tensão limite de compressão

$\sigma_t$	Tensão limite de tração
$\sigma_{pl}$	“Plateu Stress”
$\eta_{ef}$	Eficiência
$u$	Vetor deslocamentos
$\nabla$	Operador gradiente
$F$	Gradiente de deformação
$\gamma$	Multiplicador plástico
$J_2$	Segundo invariante do tensor das tensões desviadoras
$k$	Modulo compressibilidade
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\nu_p$	Coefficiente de Poisson Plástico
$p$	Pressão hidrostática
$p_c$	Pressão hidrostática de compressão cedência
$p_t$	Pressão hidrostática de tensão cedência
$f$	Função de cedência
$I$	Tensor identidade de segunda ordem
$II$	Tensor de identidade de quarta ordem
$II_d$	Tensor projetor desviador
$N$	Tensor de fluxo plástico
$D$	Matriz elasticidade
$L$	Tensor de transformação linear
$R$	Coefficiente de cedência anisotrópicos



## **CAPÍTULO 1**

### **1 INTRODUÇÃO**

Neste primeiro capítulo iremos fazer um enquadramento do tema desta tese, assim como uma breve descrição dos principais objetivos da mesma. Será abordado também, as principais motivações que levaram à realização deste estudo. Para tal, apresentar-se-á uma breve nota introdutória que terá por base a apresentação e os objetivos a atingir no trabalho de investigação, realizado ao longo desta dissertação. Será ainda feita uma pequena descrição da organização de todos os conteúdos presentes nesta tese.

#### **1.1 Nota Introdutória**

No seguimento do programa de estudos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto surgiu a oportunidade de fazer esta tese, para alcançar o grau de mestre em Engenharia Mecânica. A presente dissertação foca-se no estudo dinâmico de estruturas constituídas por espumas metálicas, com intuito de perceber qual a influência desta quando sujeita a impactos ou a cargas dinâmicas.

As principais motivações que levaram à realização deste trabalho estão relacionadas com a potencialidade deste tipo de estruturas nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e, em especial, na indústria automóvel. Neste ramo, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto tem, desde 2008, tentado aplicar as estruturas sandwich a componentes automóveis, de forma a minimizar a sinistralidade automóvel. Com o crescente aumento do mercado automóvel, é cada vez mais necessário a procura da perfeição quer em termos de consumos do automóvel, quer em termos de segurança dos passageiros. Com o aparecimento de um material, capaz de conjugar grande capacidade de absorção de energia, com elevada rigidez, tendo em conta a baixa densidade, (espuma metálica) é evidente a sua utilidade na indústria automóvel.

A aplicação deste material na indústria dos transportes, de uma forma mais afirmativa, carece de estudos de formalidade e do comportamento mecânico, que comprovem todo o potencial deste material. Com esta tese pretende-se demonstrar o comportamento das estruturas sandwich quando sujeitas a solicitações dinâmicas.

### 1.2 Apresentação e objetivos da tese

Depois de uma nota introdutória sobre o contexto onde se insere a presente dissertação, far-se-á uma breve descrição geral do trabalho desenvolvido e dos objetivos delineados inicialmente.

As estruturas sandwich com núcleo em espumas metálicas são o foco da presente exposição. O seu comportamento mecânico tem sido alvo de estudo no mundo da engenharia devido às suas excelentes propriedades. Estas estruturas são uma opção bastante apetecível para diversas aplicações estruturais, principalmente ligada às indústrias automóvel, aeronáutica e aeroespacial. A sandwich é formada por um núcleo poroso de alumínio com baixa densidade relativa e por duas faces, também de alumínio, ligados por um adesivo, normalmente a base de poliuretano.



*Figura 1.1 - Amostra da estrutura sandwich a estudar [1].*

Com base na informação já obtida relativa a este tipo de estruturas, e como esta é vista como uma solução muito atrativa para combater a crescente sinistralidade nas estradas,

esta dissertação procura responder a algumas questões, que nos permita dar passos sustentados no sentido da industrialização destas estruturas. Assim, neste trabalho através de simulações numéricas pretende-se:

- Perceber o rácio rigidez/peso de uma estrutura sandwich, comparando-o com os materiais homogéneos mais comuns;
- Conhecer e perceber a resposta da estrutura sandwich quando esta é solicitada por forças dinâmicas;

Este é o principal objetivo desta tese, no entanto procuramos em paralelo prever o comportamento dos diferentes painéis sandwich sujeitos a processos de conformação plástica.

### 1.3 Organização da tese

Descritos os principais objetivos desta dissertação, podemos estabelecer um caminho a seguir ao longo do trabalho. Para além do presente capítulo que nos oferece um enquadramento do tema da tese, a presente organiza-se em mais 6 capítulos.

Começaremos por fazer um enquadramento histórico das estruturas sandwiches, bem como dos materiais que as constituem. Posteriormente, descreveremos os constituintes destas estruturas, bem como o processo de fabrico de cada um.

No capítulo 3 será abordado as principais características mecânicas dos materiais que compõem uma estrutura sandwich. Associados a algumas destas características apresenta-se igualmente as leis constitutivas aplicadas a esses materiais e que foram objeto de análise no trabalho. Diferentes tipos de estruturas apresentam diferentes comportamentos mecânicos, deste modo será feita uma descrição neste capítulo do comportamento da espuma de alumínio e da chapa das faces, também de alumínio. No final do capítulo serão apresentadas as características dos materiais para as simulações numéricas.

Depois de determinado o comportamento dos materiais é feito, no capítulo 4, um pequeno estudo sobre as malhas e elementos a utilizar no programa de elementos finitos “ABAQUS”. Neste capítulo faremos também uma experiência que nos permitirá

comparar o peso da estrutura sandwich com a do alumínio, para uma situação de igual rigidez, verificando assim a que apresenta uma melhor rácio rigidez/peso.

De seguida, no capítulo 5 é verificado o comportamento da espuma quando sujeito a impactos dinâmicos. Deste modo, é realizado um ensaio UCB que permite comparar os diagramas de força versus deslocamento para diferentes velocidades de impacto, e perceber a quantidade de energia que a espuma absorve para impactos com diferentes velocidades.

O caso mais prático é no capítulo 6, onde será simulado um componente automóvel (uma lateral) que será manipulado para ser de estrutura sandwich. O componente automóvel será atingido por um cilindro com diversas velocidades, para poder estudar a influência da velocidade no impacto. Será feita, mais uma vez, a comparação do peso para situações com igual rigidez. Desta vez, o material escolhido para comparar com a estrutura sandwich é o aço.

Por fim, no capítulo 7 apresentam-se algumas conclusões desta dissertação, assim como algumas propostas de trabalhos futuros de maneira a evoluir e aperfeiçoar este trabalho, no sentido de perceber cada vez mais as verdadeiras qualidades das estruturas sandwiches.

## Referências

- [1] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformação Constituídas por Núcleo de espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto
- [2] Guedes, Sérgio André Remalho, “Influencia da espessura do núcleo no comportamento mecânico de estruturas sandwich com núcleo em espuma metálica”, Tese de Mestrado, FEUP, 2017, Porto



## **CAPÍTULO 2**

### **2 ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo será tratado, de forma resumida e objetiva, as estruturas sandwich com núcleo de espumas metálicas, assim como o seu desenvolvimento histórico na sociedade. Quanto à estrutura sandwich iremos apresentar os seus constituintes e respetivos processos de fabrico e as principais vantagens, desvantagens e aplicações.

#### **2.1 Desenvolvimento histórico**

Nos dias que correm as estruturas sandwich são muito comuns, sendo utilizadas de diversas formas, nas diferentes atividades do dia a dia. Este tipo de estruturas, formadas por duas faces afastadas entre si e um núcleo de material, normalmente mais leve que o material das extremidades, começou a ser explorada em 1820 por Duleau. Contudo, este conceito apenas começa a ganhar alguma relevância na indústria com o desenrolar da segunda guerra mundial. Devido à escassez de materiais, contrapondo com excesso de carpinteiros, a empresa Havilland criou uma aeronave, designada o “mosquito”. A fuselagem desta aeronave foi contruída recorrendo a uma estrutura sandwich em que as faces eram lâminas de madeira folheada e o núcleo em madeira de balsa. Depois da segunda guerra mundial, esta tecnologia foi explorada mais detalhadamente e começou a utilizar-se núcleos em favos de abelha. No entanto, a partir dos anos 60, as estruturas sandwich começam a ser mais reconhecidas nas grandes indústrias, mais concretamente, nas indústrias naval, civil, automóvel, de refrigeração, aeronáutica e aeroespacial, devido à chegada do homem à lua, transportado na conhecida cápsula Apollo, que era composta por paredes em chapas sandwich (faces de aço e núcleo em favo de abelha). No final do ano de 1960, começam a surgir os núcleos em espumas, permitindo obter maiores relações de rigidez/peso próprio [1,2].

O alumínio foi um dos primeiros metais a ser descoberto pelo ser humano, no entanto para se obter este material puro, são necessários diversos processos químicos demasiado

complexos, o que levou, no século XIX, o alumínio a ser mais valioso que o ouro. Em 1808, um químico inglês, Humphry Davy, descobriu que o alumínio podia ser produzido por redução eletrolítica de alumina (óxido de alumínio), não conseguindo provar na prática a sua teoria. Mais tarde, Has Christian Oersted, da Dinamarca, querendo produzir alumínio puro, apenas consegue obter uma liga de alumínio. Porém, em 1827, Friedrich Woehler, químico alemão, dá sequência ao trabalho realizado por Oersted e, após 18 anos de trabalho, consegue criar pequenas bolas de alumínio, em 1945 [3].

No tempo em que o alumínio era demasiado caro era utilizado para peças de luxo, como estátuas e placas comemorativas. Posteriormente, com o desenvolvimento dos processos de obtenção do alumínio, este passa a ser utilizado na decoração vitoriana como bandejas e escovas de cabelo.

Com a evolução da ciência, os processos de obtenção do alumínio ficam mais acessíveis, levando a um aumento da sua produção e, consequentemente, à diminuição do preço. Com esta desvalorização, o alumínio começa a ser utilizado em utensílios de cozinha e em alguns automóveis que possuíam painéis revestidos de alumínio puro. Contudo, o alumínio puro possui uma resistência limitada, dificultando assim o trabalho das indústrias metalúrgicas, que para este material tinham de ter um cuidado e rigor especial quando comparado com outros materiais mais resistentes [9].

Mais tarde, no século XX, as indústrias iniciaram a produção de ligas de alumínio mais resistentes, tendo sido alcançadas amostras através de tentativa erro, com fundamento na análise de experiências baseadas nos princípios metalúrgicos fundamentais [3].

No que diz respeito às espumas metálicas, que constituem o núcleo da estrutura sandwich em estudo nesta tese, elas pertencem ao tipo de materiais porosos, quer isto dizer que são materiais que contêm na sua estrutura poros (espaços vazios), diminuindo assim a sua densidade. As espumas metálicas começam a ser fabricadas, em 1948, por Benjamin Sosnik, que para fundir alumínio líquido usou vapor de mercúrio. Mais tarde, em 1956, John C. Elliot consegue desenvolver espumas metálicas já bastante próximas das que são utilizadas atualmente. No entanto, este tipo de materiais tinha uma utilização bastante moderada, devido às dificuldades no seu processo de fabrico e ainda ao custo elevado associado à produção até a década de 90. Não obstante, há alguns registos de utilização deste material em aplicações militares durante a Guerra fria [4].

Depois da guerra fria, houve um pequeno desinteresse pela comunidade científica, até que nos anos 90, começam a aparecer algumas patentes e artigos científicos descrevendo processos de fabrico, aparentemente mais eficazes para a indústria das espumas metálicas, com propósito em aplicar as espumas metálicas em aplicações correntes.

Atualmente, ainda não foram resolvidos todos os problemas de uniformidade e reprodutibilidade requeridas na produção e nos requisitos comerciais. Neste sentido, existem na Europa e nos Estados Unidos, grandes grupos de investigação pertencentes a Universidades e Institutos de investigação, que em conjunto com grandes empresas industriais estudam a espuma, segundo três grandes conceitos de investigação:

- i. Processo de fabrico – tentar otimizar os parâmetros de fabrico de forma a obter as propriedades requeridas para cada aplicação, com menos custo possível;
- ii. Avaliação das propriedades – conhecer as propriedades físicas, químicas, mecânicas, acústicas e térmicas, de maneira a identificar as potenciais aplicações nos diferentes setores industriais;
- iii. A simulação do comportamento mecânico de forma a conhecer melhor o seu comportamento na atividade prática que decidirmos aplicar a este material.

Vários autores tentam contornar estes problemas através da determinação de relação entre as propriedades elásticas com os parâmetros do material (densidade relativa, módulo de Young do material denso, geometria das células, entre outros). Contudo, o grau de controlo que o processo, de obtenção de espumas, atingiu possibilita a minimização deste tipo de problemas de uniformidade e reprodutividade, conduzindo a espumas de estrutura mais homogénea. [6]

## 2.2 Estruturas sandwich

As estruturas sandwiches são a associação de vários materiais diferentes, sendo que o comportamento mecânico da estrutura final é melhor que as partes individuais. Normalmente, as estruturas sandwiches são compostas por duas faces ou peles, que são relativamente finas, mas com elevada rigidez estrutural, um núcleo com uma maior espessura, mas mais leve e com rigidez menor que as peles e o adesivo que garante a

ligação e transmissão de forças entre as peles e o núcleo. Este tipo de associações permite encontrar materiais com uma maior rigidez e com um peso relativo bastante menor [1,7].

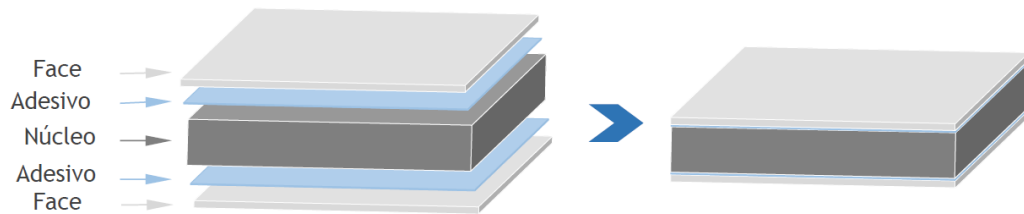


Figura 2.1 - Disposição de uma estrutura sandwich [9].

É também possível combinar diferentes materiais dependendo da aplicabilidade que queremos atribuir á estrutura sandwich. Os materiais mais usuais para as faces são: aço, alumínio, madeira, laminados de compósitos com fibras de carbono, entre outros. Já para o núcleo é usual utilizar materiais leves tais como: cortiça, balsa espumas, PVC, etc.

As estruturas sandwich são bastante utilizáveis devido ao facto de aumentar bastante a rigidez das faces, sem que isso traga aumentos significativos de peso. Isto acontece em consequência do afastamento das faces, permitindo assim um aumento do momento de inércia da estrutura e consequente, aumento de rigidez [1,7].

	Solid Material	Core Thickness $t$	Core Thickness $3t$
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

Figura 2.2 - Influência da espessura nas características mecânicas [16]

Em contrapartida, as estruturas sandwich têm alguns inconvenientes, tais como, corrosão e fadiga das faces principalmente se estas forem de materiais compósitos laminados, onde os principais mecanismos de aumento de danos na estrutura são a delaminação, que é de muito difícil deteção, e ainda danos por impacto. Dever-se-á também ter em atenção a humidade e sua absorção pelos laminados, que pode levar a um aumento de peso e diminuição da rigidez da estrutura, o que altera as principais vantagens deste material. Outras das principais desvantagens das estruturas sandwich prendem-se com os problemas relativos aos critérios e modos de rotura, à grande variedade e, por vezes, incompatibilidade dos materiais e ainda aos processos de fabrico. [10,11]

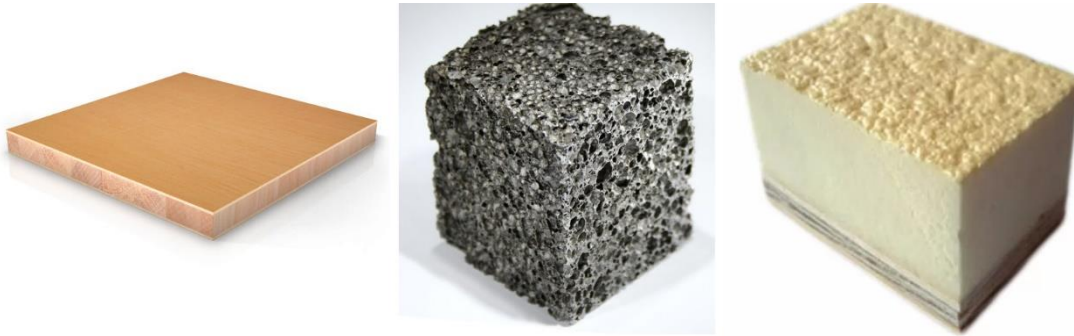
A combinação em estudo nesta tese tem como ponto de aplicação automóveis sujeitos a colisões, por isso pretende-se uma estrutura que seja leve por questões de eficiência energética e com grande capacidade de absorção de energia no caso de colisões. Posto isto, a estrutura sandwich em estudo ao longo desta tese é composta por faces de alumínio da série 5XXX laminada, de 1mm de espessura. O núcleo é formado por espuma de liga de alumínio de célula fechada também conhecido por ALPORAS, com 8mm de espessura. A espuma em estudo é fabricada pela empresa Shinko Wire Company, localizada no Japão. A ligação entre o núcleo e as faces é feita através de um adesivo à base de poliuretano.

### 2.2.1 Núcleo

O núcleo é o grande responsável pela elevada razão rigidez/peso, uma vez que são de materiais com baixa densidade e permite o afastamento das faces aumentando a resistência à flexão, como podemos verificar na figura 2.2. Além disso, o núcleo tem função de suportar os esforços de corte, de compressão e evitar que as faces deslizem uma relativamente à outra. O núcleo também pode ser fundamental no isolamento térmico e acústico, bem como no controlo de vibrações dependendo do material que se escolha para esse efeito [12].

A primeira estrutura sandwich tinha núcleo em madeira de balsa, que ainda é muito utilizada atualmente devido à sua baixa densidade e facilidade de manobrar. Os materiais mais utilizados são espumas poliméricas expandidas como poliuretano (PUR) e poliestireno (PS), são materiais que permitem obter formas complexas, que são utilizados

principalmente na construção civil. Para casos com maior exigência mecânica são utilizados materiais de origem metálica sob a forma de favo de abelha ou em espuma metálica [13].

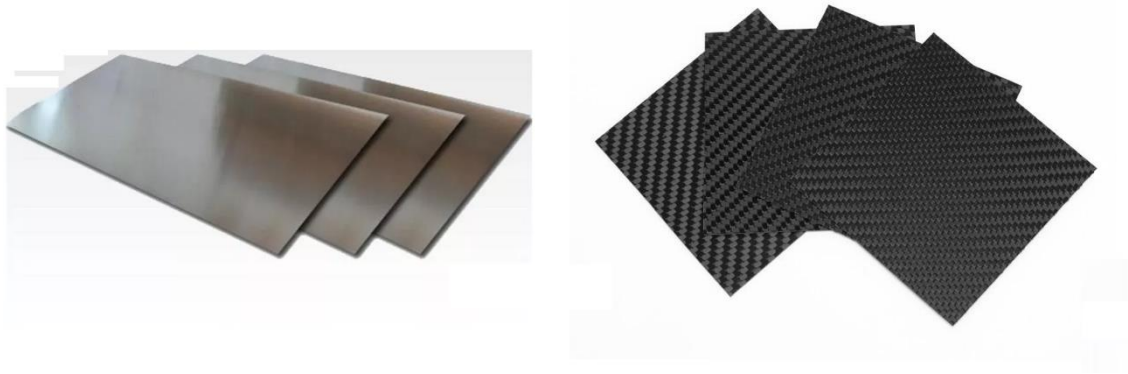


*Figura 2.3 - Tipos de materiais utilizados para núcleos [17-19]*

### 2.2.2 Faces

As faces têm a particularidade de suportar tensões normais, por isso este componente requer uma rigidez considerável. Além disso, existem também outras propriedades a ter em conta, dependendo do tipo de aplicação que se pretende para a sandwich, tais como a resistência ao impacto, à corrosão e à humidade. Não menos importante, é a necessidade de garantir que todos os componentes se comportem elasticamente de forma semelhante para tentar minimizar o máximo possível a possibilidade de separação de camadas [16].

Como já foi referido anteriormente, as faces mais utilizadas em estruturas sandwich são aços, ligas de alumínio, madeiras e seus derivados e materiais de origem polimérica. Nesta tese serão utilizadas faces de ligas de alumínio, que têm como principais benefícios a elevada resistência mecânica e à corrosão, baixo custo e facilidade de produção em série. Por sua vez, estes materiais apresentam também alguns inconvenientes como elevada densidade e alguns problemas na adesão [1,12].



*Figura 2.4 - Tipo de materiais utilizados para faces de estruturas sandwich [20,21]*

### 2.2.3 Adesivo

O adesivo é de grande importância numa estrutura sandwich, uma vez que ele estabelece a ligação entre o núcleo e as faces. Deste modo, e como um desmembramento entre o núcleo e as faces pode ser fatal para a vida da estrutura sandwich, o adesivo não pode ser o elemento mais fraco. Por isso, este deve ter propriedades mecânicas melhores ou pelo menos semelhantes às do núcleo [1].

Os adesivos podem ser materiais sólidos, líquidos ou pasta e são feitos à base de resinas epoxídicas, fenólicas, poliuretano, silicones, elastómeros, produtos animais, entre outros. Posto isto, verificamos que existe uma grande variedade de adesivos e que estes são adaptáveis a qualquer junta de materiais, como é o caso das juntas das faces e do núcleo numa estrutura sandwich [14].

Contudo, nem sempre é possível garantir o correto funcionamento do adesivo, podendo ele romper a ligação entre os materiais. As falhas do adesivo devem-se a vários fatores, tais como: a escolha errada do adesivo, má aplicação, solicitação inadequada, entre outros, e podem classificar-se como coesiva ou adesiva [13].

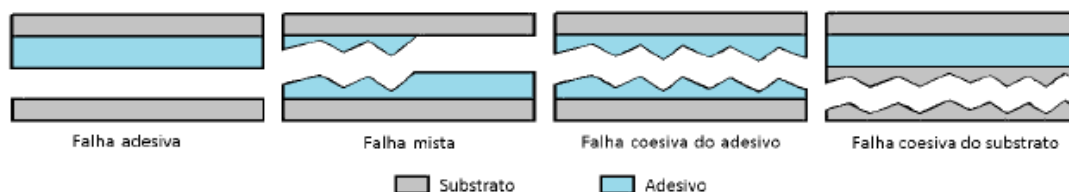


Figura 2.5 - Tipos de falhas no adesivo [13].

Como é perceptível na figura 2.3, as falhas adesivas correspondem quando o adesivo não se consegue manter colado ao substrato, enquanto as falhas coesivas consistem quando existe uma rotura, ou do adesivo ou do substrato, isto acontece quando a colagem entre o adesivo e o substrato é mais resistente que o próprio adesivo ou substrato, respetivamente. Por fim, podemos ainda obter uma falha mista em que existe falha adesiva e coesiva, simultaneamente.

*“Um das principais características de um bom adesivo é a capacidade de endurecer durante o processo de polimerização e sofrer de deformação durante o endurecimento de forma a libertar tensões residuais existentes.” [9]*

### 2.2.4 Comportamento Estrutural

Como já foi referido anteriormente, as estruturas sandwiches têm ganho uma relevância na indústria devido à necessidade de aumentar a rigidez sem que o aumento de peso seja significativo. Isto acontece devido à conjugação de um material de baixa densidade, mas com uma rigidez de corte suficiente para evitar o escorregamento das faces em relação ao núcleo, que é usado entre as faces (núcleo) e um material com elevada resistência mecânica normalmente usado nas extremidades, local onde as tensões normais são maiores. Esta conjugação permite aumentar a eficiência dos materiais, como pretendido. Para estabelecer a ligação entre o núcleo e as faces é usualmente utilizado um adesivo que permita a transferência dos esforços entre as faces [9].

Outro aspeto importante na seleção dos componentes de uma estrutura sandwich é a ocorrência de instabilidades locais na face que está à compressão, isto pode ocorrer se a

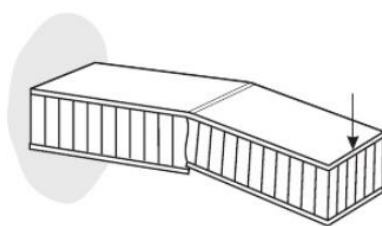
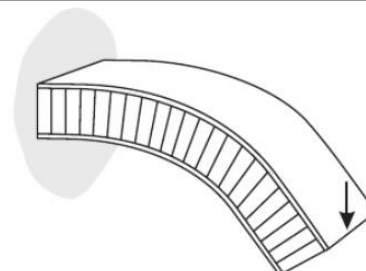



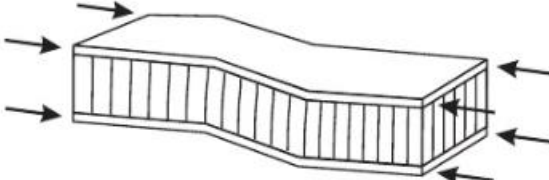

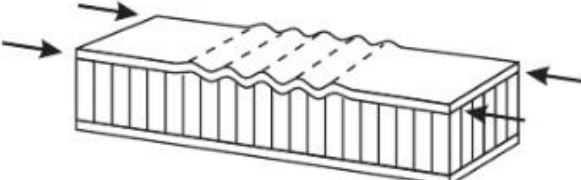
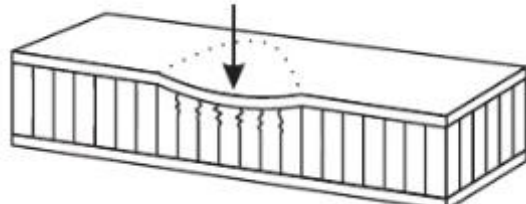
rigidez do núcleo for inadequada, se as faces forem demasiado finas ou se existir uma má colagem entre o núcleo e as faces [1].

Posto isto, verificamos que existe uma aproximação entre o comportamento de uma estrutura sandwich com o comportamento de um perfil I, em que as faces funcionam como banzos, suportando as tensões axiais resultantes dos momentos fletores e o núcleo funciona como alma da viga, resistindo às tensões de corte geradas pelo esforço transversal e pela torção.

Contrapondo com a melhoria da eficiência, as estruturas sandwiches têm também algumas falhas muito próprias, como podemos ver a descrição destas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tipos de falhas [16]

Modo de falha	Ilustração	Descrição
<b>Resistência</b>		Os materiais das faces e do núcleo devem ser capazes de resistir às tensões normais e de corte induzidas. Assim como o adesivo terá de ser capaz de garantir a transferência das tensões de corte entre as peles e o núcleo.
<b>Rigidez</b>		A estrutura deve possuir rigidez suficiente para evitar flexão excessiva.
<b>Deformação local</b>		A espessura do núcleo e o módulo de corte têm de ser adequados de modo a prevenir a deformação local da estrutura devido

		a cargas de compressão.
<b>Deformação global</b>		Pode ser consequência da deformação local. Assim como na deformação local, a espessura do núcleo e o módulo de corte têm de ser adequados.
<b>Enrugamento das faces</b>		A resistência do núcleo à compressão terá de ser suficiente, bem como a resistência dos adesivos na situação de tensão no plano.
<b>Instabilidade Intracelular</b>		Na presença de um núcleo celular, de modo a não ocorrer este tipo de falha, o tamanho das células deverá ser suficientemente pequeno em relação à espessura das faces.
<b>Esmagamento local do núcleo</b>		A resistência à compressão do material do núcleo não pode ser demasiado baixa.

## 2.3 Estrutura da espuma do núcleo

As espumas metálicas pertencem ao grupo dos materiais celulares ou porosos, este tipo de materiais estão frequentemente representados no dia à dia em materiais como a cortiça, a madeira, coral, osso, entre outros. Este tipo de materiais têm vindo a aumentar o interesse na indústria devido à sua capacidade de conjugar elevada capacidade de absorver energia, com baixa densidade relativa [15].

Os materiais porosos são relativamente novos no mundo da engenharia, devido à sua complexidade de produção. Só recentemente, com a evolução da tecnologia e consequentemente melhoria dos processos de fabrico, começou a ser rentável criar materiais celulares. Contudo, ainda se aposta bastante no desenvolvimento deste processo de fabrico com vista a melhorar o produto final, isto acontece devido ao potencial destes materiais, que para além de apresentarem uma elevada relação rigidez/peso, têm uma excelente capacidade de absorção de energia, absorção de vibrações e isolamento térmico. Atualmente, estes materiais assumem importância de relevo nas indústrias aeronáuticas, aeroespacial e automóvel.

As estruturas das espumas correspondem a arranjos tridimensionais de células, que podem ser divididos em dois grupos: células abertas e células fechadas. Isto é, se os poros da espuma partilharem entre si as paredes e as arestas, estamos perante as estruturas de espuma de célula fechada. Enquanto nas estruturas de espuma de células abertas os poros formam uma rede interligada. As espumas metálicas são materiais de baixa densidade devido ao nível elevado de porosidade, volume composto por vazio, que está compreendido entre 75-95% [23-25].

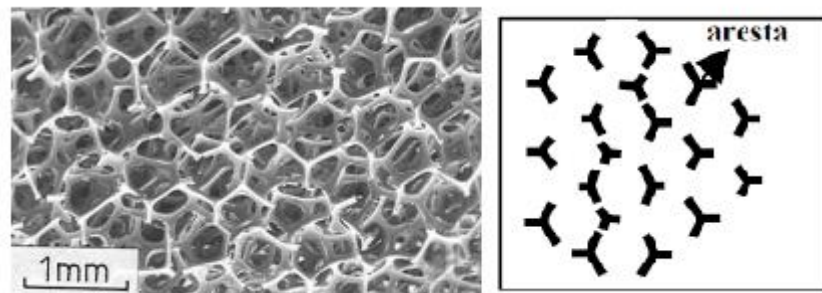
As espumas metálicas mantêm parte das propriedades físicas, do material de base, são não inflamáveis, e permanecem não inflamáveis. Dependendo do material de base são também recicláveis e algumas flutuam na água. O coeficiente de expansão é semelhante ao material de base, o mesmo não acontece com a condutibilidade térmica que é menor nas espumas.

Nesta tese é utilizado para núcleo da estrutura sandwich espuma metálica, de uma liga de alumínio (99,5 % Al 1,5% Ca 1,5% Ti), do tipo de célula fechada (ALPORAS), com

um diâmetro médio de células entre 4-6 mm e com uma densidade de  $0,25 \text{ kg/m}^3$ , ou seja, cerca de 9% da densidade da liga de alumínio.

### 2.3.1 Espumas metálicas de célula aberta

As espumas de células abertas encontram-se ligadas entre si exclusivamente por arestas ver figura 2.6 Esta característica pode ser verificada através de uma análise microscopia ou pela avaliação da permeabilidade da espuma a um determinado fluido (gás ou líquido).



*Figura 2.6 - Espuma metálica de célula aberta [26, 6].*

As espumas metálicas de célula aberta têm um ótimo desempenho, no entanto é de difícil produção e consequentemente custo elevado, o que faz que seja utilizado maioritariamente em indústrias mais exigentes como na indústria aeroespacial. No entanto, podem ser utilizados noutras aplicações, como por exemplo permutadores de calor, absorção de energia e difusão de fluxo. As espumas de célula aberta com células muito pequenas para serem visíveis a olho nu são também usados como filtros de alta temperatura na indústria química [23,24].

### 2.3.2 Espumas metálicas de células fechadas

As espumas metálicas de célula fechada partilham entre si paredes e as arestas. Os poros destas espumas são feitos a partir da injeção de um gás ou mistura de um agente

( $\text{TiH}_2$  maioritariamente) que possibilita o aparecimento de porosidades em metais fundidos. [9]



Figura 2.7 - Estrutura celular - espumas de célula fechada [27, 9].

Para estabilizar as bolhas de material fundido, é necessário um agente de formação de espuma de alta temperatura (para definir o tamanho das partículas sólidas). Normalmente, os poros ou células têm um tamanho entre 1 e 8 mm. As espumas metálicas de célula fechadas são usualmente utilizadas em solicitações de impacto devido à sua excelente capacidade de absorver energia. Contrariamente com o que acontece com a maioria das espumas de polímero, as espumas metálicas permanecem deformadas após o impacto, quer isto dizer que são deformadas plasticamente. Devido às excelentes performances deste tipo de espumas, elas já estão a ser testadas experimentalmente para próteses de animais.

### 2.3.3 Processo de fabrico da espuma

As espumas metálicas podem ser obtidas através de várias técnicas de processos de fabrico (figura 2.8), no entanto, e como já foi referido, estes ainda estão em fase de investigação por parte da comunidade científica, no sentido de melhorar o produto final. Contudo, os avanços conseguidos nos últimos anos já permite a obtenção de materiais porosos com um rigor aceitável. Existem vários métodos de obtenção de espumas metálicas, no entanto nesta tese serão referidos apenas os mais utilizados na indústria [28]:

- I. Insuflação de ar da liga metálica no estado líquido;
- II. Utilização de um agente que promova a formação de espuma;
- III. Consolidação de um pó metálico com um agente que promove a formação de espuma, seguindo de aquecimento para ativar o reagente;
- IV. Produção de um molde cerâmico através de uma cera ou um precursor espuma de origem polimérica, seguido de queima do precursor e pressurização com o metal líquido ou uma pasta de pó metálico que posteriormente é sintetizado;

Estes métodos são aplicáveis a um grupo específico de materiais, criando espumas com diferentes propriedades como a densidade relativa e o tamanho de células assim como o tipo de células abertas ou fechadas.

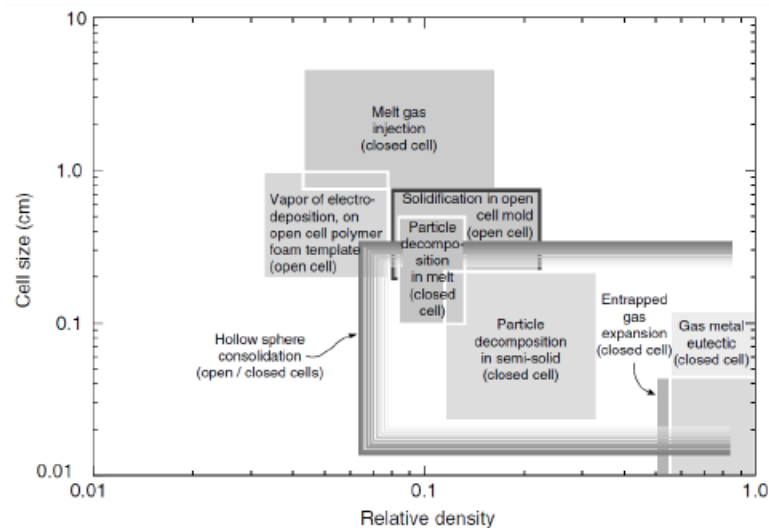


Figura 2.8 - Processos de fabricação da espuma metálica [24].

### I. Insuflação de ar através de uma liga metálica no estado líquido

A tarefa de criação de espumas metálicas não se projeta nada fácil, quando se trata de metais puros, visto que a espuma resultante não é suficientemente estável e colapsa antes do metal solidificar. Para tentar eliminar este efeito, são adicionadas pequenas partículas de óxido de alumínio, que têm a função de aumentar a viscosidade do metal e a estabilidade da espuma quando arrefecida. Este processo é o mais utilizado para formar espumas de alumínio devido ao metal de base (Al) apresentar baixa densidade e não oxida excessivamente quando o metal líquido é exposto ao ar ou a qualquer outro gás que contenha oxigénio. Para criar bolhas no alumínio fundido é insuflado um gás. O gás mais

utilizado é o ar, no entanto existe uma grande variedade de gases que servem para o mesmo efeito, tais como: dióxido de carbono, oxigénio ou até mesmo água. As bolhas tendem a deslocar-se para a superfície, onde irão solidificar, dando origem à espuma metálica, figura 2.9. As características da espuma resultante são controladas através da injeção do ar, da temperatura, da velocidade de arrefecimento e da viscosidade do metal.

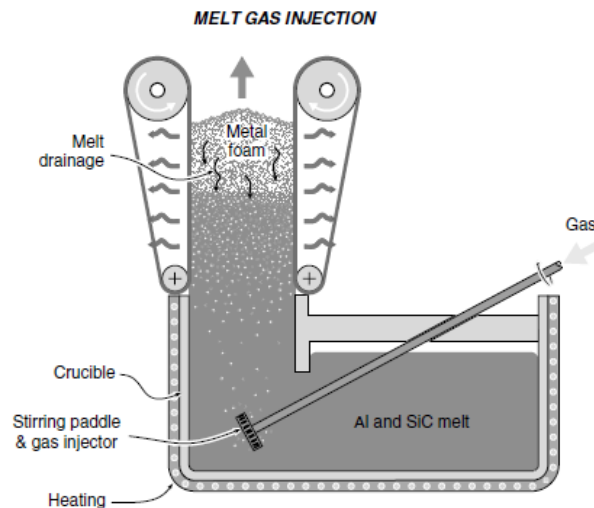


Figura 2.9 - Processo de fabrico de insuflação de ar através de uma liga metálica no estado líquido [24].

Este processo é bastante utilizado na produção de blocos de espuma metálica com dimensões até  $2,44 \times 1,22 \times 0,42$  metros, com células fechadas de 5 a 20 mm de diâmetro. Numa primeira fase este processo estava patenteado por uma empresa canadiana que se dedicava à produção de alumínio ALCAN, mas atualmente este método é dividido por duas empresas CYMAT (empresa também canadiana e especialista mundial na produção de espumas de alumínio) e NORSK-HYDRO (empresa norueguesa de produção de alumínio fortemente virada para o ramo das energias renováveis).



*Figura 2.10 - Estrutura obtida pelo processo de fabrico de insuflação de ar através de uma liga metálica no estado líquido [6].*

### II. Mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão no arrefecimento

As espumas metálicas podem ser obtidas através da mistura de um agente, que liberta gás quando aquecido, com ligas metálicas. O agente formador da espuma é o hidreto de titânio ( $TiH_2$ ) que, quando aquecido acima de  $465^{\circ}C$ , inicia a sua decomposição em Ti e num gás  $H_2$ . Se ao alumínio líquido adicionarmos partículas de hidreto de titânio, rapidamente causará uma libertação de gás, criando bolhas que formarão espuma metálica de célula fechada. Tal como, no processo anterior, a viscosidade do metal deverá ter valores elevados, uma vez que, uma viscosidade reduzida pode provocar a união das bolhas, criando assim uma estrutura de célula aberta. Neste sentido, é adicionado cálcio ao metal, quando este já se encontra totalmente fundido para aumentar a sua viscosidade. Este processo pode ser controlado através da manipulação da quantidade de agente utilizado, pelas condições de arrefecimento e pela pressão exterior. A espuma resultante deste processo tem células com diâmetro entre os 0,5 e os 5mm e uma densidade relativa entre 0,2 e 0,07.



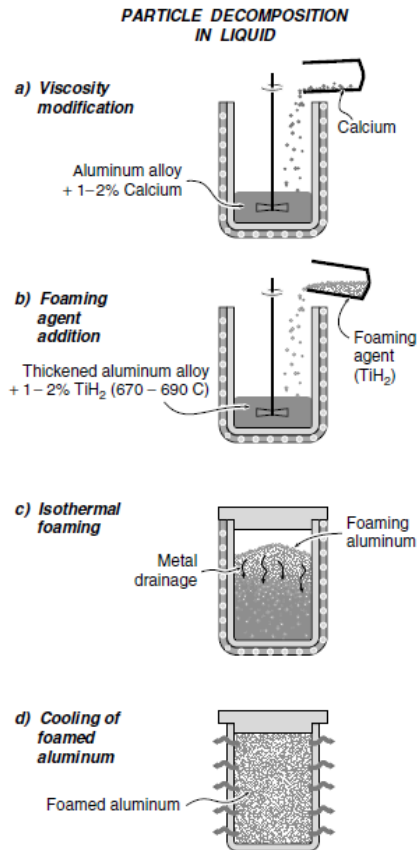


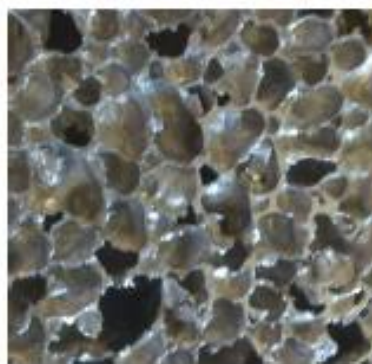
Figura 2.11 - Processo de fabrico de espuma metálica, mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão e no arrefecimento [24].

Pela observação da figura 2.11, verifica-se que o processo inicia pela fusão do alumínio e a sua estabilização a uma temperatura entre 670° e 690°C. Para aumentar a viscosidade é adicionado cálcio que rapidamente oxida e forma  $CaO$  e  $CaAl_2O_2$ , figura 2.11, a). Ao metal líquido é adicionado 1 a 2 % de hidreto de titânio na forma de partícula de 5 a 20  $\mu m$  de diâmetro, figura 2.11, b). Assim que as partículas estejam dispersas no metal líquido retira-se o misturador e a espuma pode formar-se na escória do metal, figura 2.11, c). Por fim, retira-se o aquecimento e assim o metal começa a solidificar, figura 2.11, d).

Este processo é unicamente utilizado para a obtenção de espumas de alumínio, uma vez que o agente utilizado se decompõe demasiado rápido às altas temperaturas de fusão de outros metais.

Esta técnica foi desenvolvida pela Shinko Wire que é a empresa que explora este processo, cujo nome comercial do produto é ALPORAS, que é exatamente o mesmo tipo

de espuma metálica utilizado no núcleo da estrutura sandwich em estudo ao longo desta tese.



*Figura 2.12 - Estrutura obtida pelo processo de espuma metálica, mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão e no arrefecimento [6].*

### III. Consolidação de um pó metálico com um agente que promove a formação de espuma, seguindo de aquecimento para ativar o reagente;

Ao contrário do que acontece nos processos anteriores, é possível introduzir os agentes em metais no estado sólido, através da mistura e consolidação de pós. O hidreto de titânio, o agente mais usual no processo de fabrico de espumas metálicas, começa a decompor-se aos 465°C, um valor bastante abaixo do ponto de fusão do alumínio e suas ligas (por volta dos 660°C). Posto isto, aumenta a possibilidade de criar uma espuma dispersando o agente em alumínio sólido usando o processo de metalurgia “poder metallurgy processes” (processo de metalurgia em pó). Posteriormente, aumenta-se a temperatura até permitir a libertação do gás e fundir total ou parcialmente o metal de forma a permitir os poros a crescer. Após a formação dos poros é necessário um arrefecimento adequado que permita que a espuma estabilize.

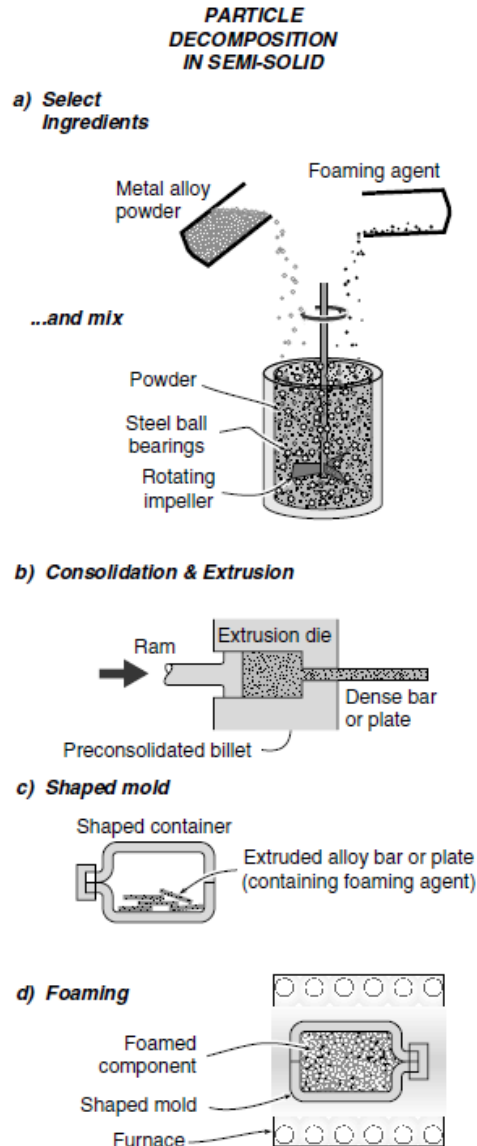


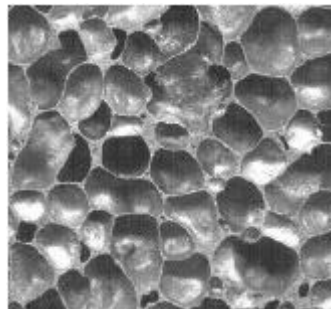
Figura 2.13 - Processo de fabrico de espuma metálica consolidação de um pó metálico com um agente que promove a formação de espuma, seguindo de aquecimento para ativar o reagente [24].

Na figura 2.13, podemos observar a sequência deste processo, que começa com a mistura de partículas de hidreto de titânio ( $\text{TiH}_2$ ) com o pó de liga de alumínio (figura 2.13, a)). Depois de bem misturados, ainda no estado sólido, a mistura é compactada e em seguida extrudida em pequenas barras ou placas, chamadas de precursores (figura 2.13, b)). O precursor é então passado para um molde, onde vai ser aquecido até que o metal funda (figura 2.13, c)). O aquecimento vai permitir a libertação do gás, formando assim a espuma metálica (figura 2.13, d)).

Este processo foi desenvolvido por várias empresas, nomeadamente a IFAM (instituto de investigação científica alemão), LKR (instituto austríaco de investigação ligado à

tecnologia de metais leves) e a Neuman-Alu (empresa austríaca especialista no desenvolvimento e produção de peças de alumínio de grande qualidade).

Mais recentemente, foi desenvolvida uma variante deste processo, o precursor é laminado entre duas faces metálicas, formando assim uma estrutura sandwich com um núcleo sólido. Este processo traz vantagens no ponto de vista da conformação plástica de estruturas sandwich devido ao núcleo ainda se encontrar no estado sólido e assim mais fácil trabalhar. Finalmente, aquece-se o material para formar a espuma.



*Figura 2.14 - Forma final da espuma através do processo de fabrico consolidação de um pó metálico com um agente que promove a formação de espuma, seguindo de aquecimento para ativar o reagente [6].*

IV. Produção de um molde cerâmico através de uma cera ou um precursor espuma de origem polimérica, seguido de queima do precursor e pressurização com o metal líquido ou uma pasta de pó metálico que posteriormente é sintetizado;

Existe uma enorme variedade de espumas poliméricas de densidade relativa baixa e com uma diversidade em tamanho de células. Deste modo, essas espumas podem ser utilizadas como modelos para criar moldes para o processo de “investment casting”. Este método é usado pela empresa ERG (empresa norte americana líder mundial na produção de espumas metálicas de célula aberta) para produzir componentes para indústria aeroespacial.

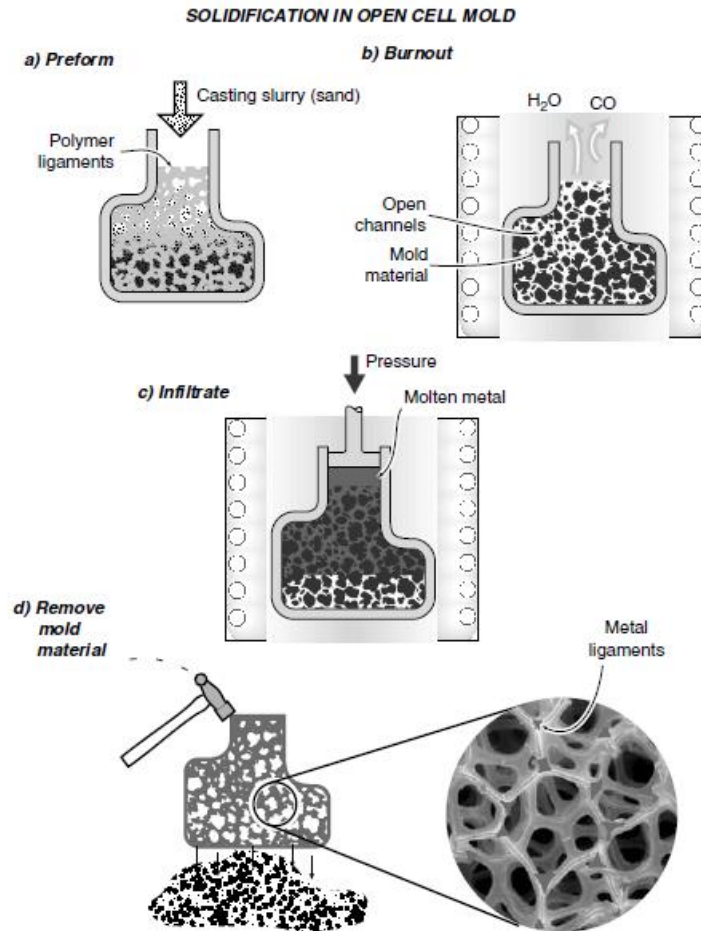


Figura 2.15 - Processo de fabrico de espumas metálicas "Investment casting" [24].

A figura 2.15 mostra-nos esquematicamente os passos do processo investimento casting. Inicialmente, é escolhida a espuma polimérica que servirá como molde, posteriormente o molde é revestido por uma barbotina cerâmica e, de seguida, pulverizado com partículas cerâmicas (figura 2.15, a)). A carapaça cerâmica é sujeita a um tratamento térmico de cozedura, onde no decorrer deste o material polimérico se decompõe (figura 2.15, c)), deixando assim vazios para o vazamento de metal fundido (figura 2.15, c)). Após o arrefecimento do metal, a carapaça cerâmica é destruída, obtendo-se a espuma metálica pretendida (figura 2.15, c)).

Com este processo é possível contruir estruturas de grande qualidade, variando a distribuição dos poros de 2,5 a 16 cm<sup>2</sup>, com uma gama de porosidade de 80 a 90%. Esta técnica permite produzir componentes de geometria bastante complexas para uma vasta gama de metais, tais como: alumínio, cobre, zinco, níquel, prata, ouro, entre outros. [6, 24].



*Figura 2.16 - Forma da espuma obtida pelo processo "Investment casting" [6].*

### 2.3.4 Aplicações

As excelentes propriedades das espumas metálicas aumentam a sua utilidade e faz com que sejam um material aplicado em diversas áreas.

Na área da aeronáutica e aeroespacial, onde o rigor é máximo, este material é usado para suporte de combustível para foguetes. Este caso é um excelente exemplo, visto que as espumas desempenham mais que uma função: têm que ter capacidade estrutural para suportar o combustível, têm de auxiliar na redução de vibrações e ainda têm de conduzir o calor promovendo uma melhor combustão [9].



*Figura 2.17 - Exemplos de aplicações na aeronáutica e aeroespacial [6].*

Também nos depósitos de nitrogénio líquido, para a utilização em câmaras de infravermelhos de aviões, utiliza-se este mesmo princípio. Neste caso, as propriedades de

condução da espuma mantêm a temperatura aproximadamente constante e uniforme em todo o depósito ao mesmo tempo que evitam a movimentação do líquido [6, 24].



*Figura 2.18 - Depósito de nitrogénio para aviação.*

Outro ramo onde se está a apostar bastante no estudo das espumas metálicas é no setor automóvel, devido à grande capacidade de absorção de energia por parte das espumas, esta torna-se particularmente interessante no estudo de impactos. Posto isto, e no sentido de aumentar a segurança dos passageiros, a indústria automóvel tem estudado a aplicação de espumas metálicas em chassis, tornado os veículos mais leves e mais rígidos e com maior capacidade de absorver energia em caso de impacto. Também no setor militar, a grande capacidade de absorção de energia está a ser utilizada para proteção de veículos e equipamentos contra projéteis e ondas de choque causadas por explosões [6, 24].



*Figura 2.19 - Exemplos de aplicações estruturais [9].*

Estes materiais encontram ainda aplicações em permutadores de calor, filtros, catalisadores, difusores de gases, corta chamas, suportes para absorção de vibrações, placas para utilização na proteção civil, entre outras.



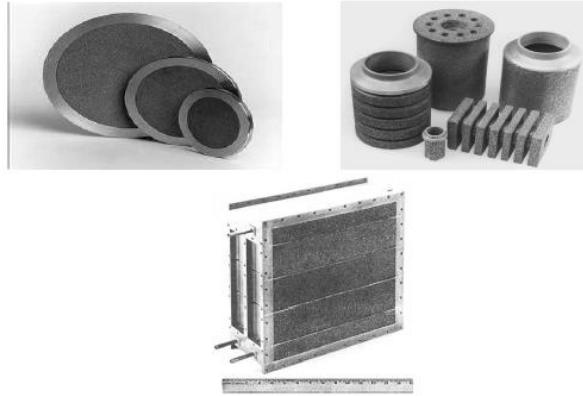
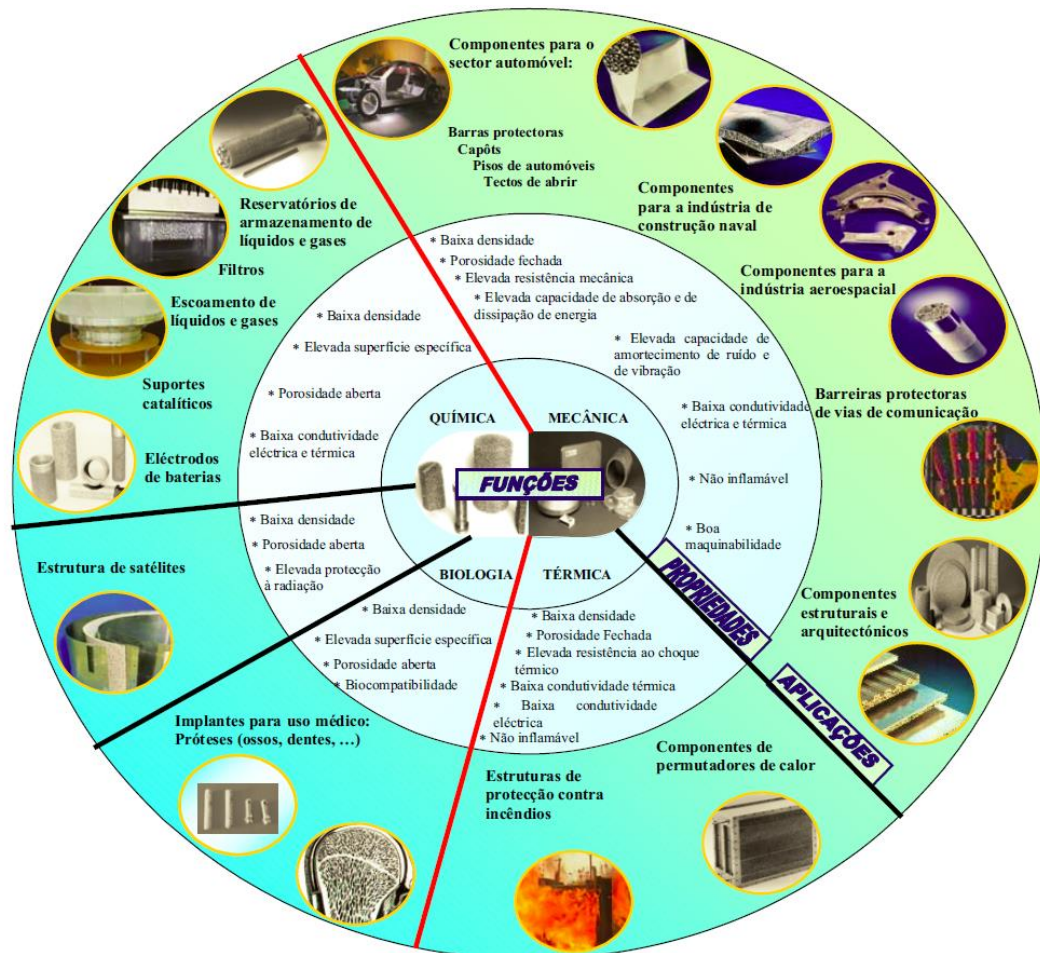


Figura 2.20 - Exemplos de aplicações na área de transferência de calor [6, 24].

Contudo, existe muitas outras áreas onde as espumas metálicas estão em desenvolvimento e a ganhar grande relevância. A figura 2.21 demonstra um pouco da variedade e do tipo de funções que este material pode ter nas várias áreas da indústria e sociedade [6, 24].





*Figura 2.21 - Exemplo de funções e aplicações que se pode dar as espumas metálicas [16].*

## 2.4 Estrutura da chapa das faces

O alumínio é o material das faces da estrutura sandwich em estudo ao longo desta tese. Estas faces caracterizam-se por serem estruturas sólidas homogêneas e planas de uma determinada espessura.

O alumínio tem uma baixa resistência mecânica, o que o limita de ser escolhido para aplicações onde a resistência à deformação e à fratura são essenciais. Deste modo, para obter uma melhor resistência mecânica do alumínio, sem prejuízo das restantes propriedades, é adicionado pequenas partículas de outros elementos, criando assim as ligas de alumínio. A variedade de combinações entre o alumínio e diferentes elementos dão origem a novas ligas de alumínio, com diferentes propriedades que podem ser determinantes para função a desempenhar.

A chapa de alumínio, da estrutura sandwich utilizada neste tese, tem 1 mm de espessura e são de uma liga de alumínio (AlMg<sub>3</sub>) EN AW 5754, com um módulo de elasticidade de 70 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,33.

### 2.4.1 Processo de fabrico

A facilidade de trabalho do alumínio permite que este seja obtido por diferentes processos metalúrgicos e podem obter também diferentes formas. A forma mais usual no dia a dia é a forma plana ou chapa, esta forma é obtida através de um processo de deformação plástica que se chama laminagem. Neste processo, o material é forçado a passar por entre dois rolos (cilíndricos), que rodam em sentido opostos, mas com a mesma velocidade periférica. Os rolos estão distanciados entre si com um valor inferior a valor pretendido para a espessura da chapa laminada, uma vez que depois de passar pelos rolos o alumínio tem um retorno elástico, que o faz voltar à espessura pretendida. A propulsão do material durante a laminagem é efetuada pelas forças de atrito, figura 2.21.

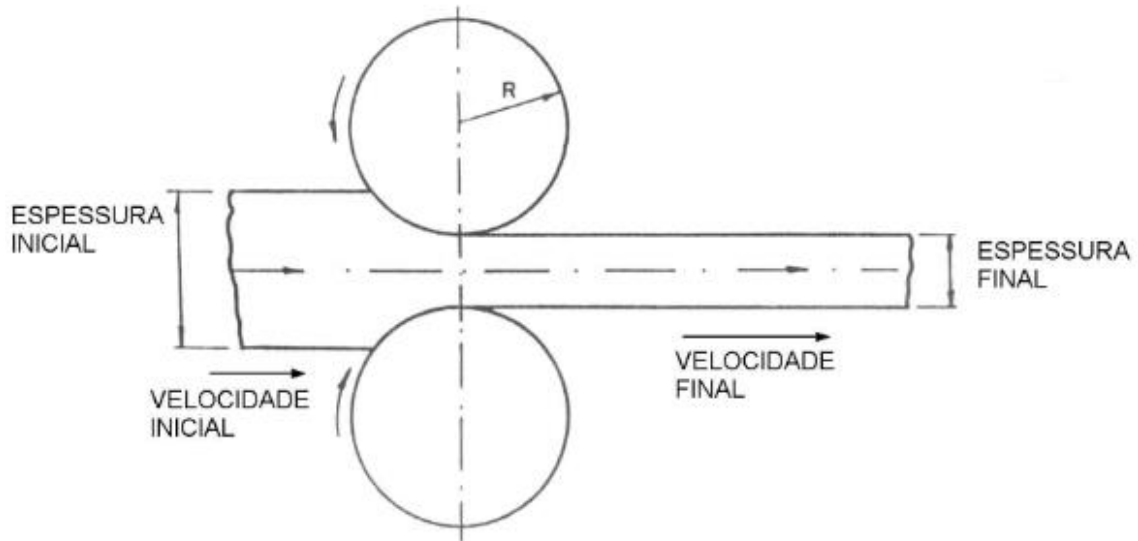


Figura 2.22 - Processo de laminagem [29].

O método de laminagem quando aplicado a ligas de alumínio dá origem a estruturas metalúrgicas caracterizadas por terem uma orientação preferencial, resultante da rotação e alongamento dos grãos na direção de laminagem de maneira a acomodar a deformação que é aplicada pelos rolos. Esta orientação preferencial dos grãos está na base do fenómeno de anisotropia que é típico no comportamento material deste tipo de estrutura, especialmente quando são usadas em processo de conformação plástica [3].

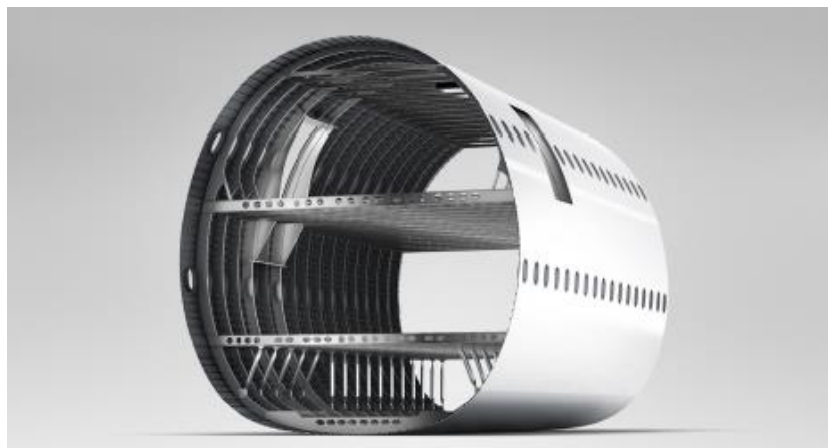
### 2.4.2 Aplicações

Devido à abundância do alumínio na crosta terrestre, este material é utilizado cada vez mais e nas diversas áreas da indústria. Mais concretamente, as chapas de ligas de alumínio estão presentes em materiais comuns do dia a dia, tais como indústria de embalagens e utensílios de cozinha.



*Figura 2.23 - Exemplo de embalagens e utensílio de cozinha de alumínio [30].*

A elevada razão de resistência mecânica / peso faz com que o alumínio seja muito utilizado nas indústrias dos transportes, pois permite uma maior economia de carga, menos consumo de combustível e menor desgaste. A excelente resistência à corrosão permite ao veículo uma maior durabilidade, exigindo consequentemente menor custos de manutenção. A formação de ligas de alumínio e por consequência do aumento da resistência mecânica permite que estas sejam a parte predominante na construção de um avião, cerca de 80% em peso.



*Figura 2.24 - Fuselagem de uma aeronave em alumínio [16].*

O alumínio é também peça fundamental na construção de automóveis. Partes como carroçarias, pistões, blocos de motores, chassis, e acessórios são contruídos todos à base de alumínio e suas ligas, isto permite um menor consumo de combustível, que levará a uma redução considerável de emissões de gases poluentes. Segundo o protocolo de

Quioto, para cada quilograma de redução do peso de um veículo há uma redução de 20kg de emissão de carbono equivalente [3, 14].



*Figura 2.25 - Carroçaria de um automóvel em alumínio [31].*

Também na construção civil as ligas de alumínio são cada vez mais utilizadas, uma vez que se trata de um material leve, versátil e resistente. Estes laminados são muito utilizados na cobertura, em fachadas de edifícios, em revestimentos internos e externos na ventilação, iluminação, entre outros. [3].



*Figura 2.26 - Exemplo da utilização do alumínio na construção civil [3].*

## Referências

- [1] DIAB, DIAB Sandwich Handbook, Sweden, 2003.
- [2] Fundamentos e aplicacoes do aluminio, Associacao Brasileira do Aluminio - ABAL, maio/2007.
- [3] M. Judge, “Foam sweet foam” , New Scientist, 34-37 1997.
- [4] <http://www.cymat.com>.
- [5] Duarte, I., “Espumas metálicas Processo de fabrico, caracterização e simulação numérica”, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 2005.
- [6] Allen, H. G., Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon Press, 1969.
- [7] Davies, J. M., Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Publishing, 2001.
- [8] Lopes, N., Analise e Caracterizacao da Degradação de Compositos Reforcados com Fibra de Juta e Fibra de Vidro em Ambiente Controlado (Temperatura & Humidade), Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2009.
- [9] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformação Constituídas por Núcleo de espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto
- [10] Department of Defense, Composite Materials Handbook - Vol.3.
- [11] Soares, B., “Estruturas Sandwich com Utilização de Núcleos de Cortiça”, Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa., 2007.
- [12] Zenkert, D., The Handbook of Sandwich Construction, EMAS, Cradley Heath, 1997.
- [13] Carvalho, P., Analise do Comportamento Mecânico e Identificação do Tipo de Falha em Estruturas Sandwich com Núcleos de Cortiça, Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2008.
- [14] Belbute, P., Estudo do Comportamento em Flexão de Vigas Compósitas Sandwich, Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2010.
- [15] Jackson, R., Combat Legend de Havilland Mosquito, Airline, Shrewsbury, 2003.
- [16] Guedes, Sérgio André Remalho, “Influencia da espessura do núcleo no comportamento mecânico de estruturas sandwich com núcleo em espuma metálica”, Tese de Mestrado, FEUP, 2017, Porto.
- [17] <http://www.nauticexpo.com/pt/fabricante-embarcacao/painel-sanduiche-pau-de-balsa-44806.html>.

- [18] <http://villainousvoodoo.com/archives/date/2016/04>.
- [19] [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-797289288-espuma-pu-poliuretano-enchimento-cola-isopor-a-b-2-kg-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-797289288-espuma-pu-poliuretano-enchimento-cola-isopor-a-b-2-kg-_JM).
- [20] [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-845935417-chapa-aco-ferro-cortada-40-cm-40-cm-48-mm-milimetros-316-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-845935417-chapa-aco-ferro-cortada-40-cm-40-cm-48-mm-milimetros-316-_JM).
- [21] <https://carbonfiberglass.com/products/high-gloss-carbon-fiber-sheet-sample-pack-4-piece-pack>.
- [22] Tekoglu, C., Size effects in cellular solids, Rijksuniversiteit Groningen, 2007.
- [23] <http://www.metalfoam.net>.
- [24] MF Ashby et al., Metal foams: a design guide, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [25] Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck, 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foam technology – MetFoam200031 MIT Verlag, 14–16, Bremen, Germany, 2001.
- [26] <https://www.rug.nl/research/portal/files/14543028/c1.pdf>.
- [27] <http://newshawktime.com/north-america-aluminum-foam-market-comprehensive-analysis-opportunities-classifications-applications-expert-opinions/>
- [28] M.H. Luxner et al. / Acta Biomaterialia 5, 381–390, 2009.
- [29] <https://abcdopolimero.wordpress.com/tag/laminacao/>
- [30] <http://embalagensdealuminio.com.br/latas-de-bebidas-e-alimentos/dsg>
- [31] <http://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/beneficios-do-aluminio-e-da-fibra-de-carbono/dsg>
- [32] <http://premonta.com.br/quatro-dicas-importantes-sobre-estrutura-metalica/>

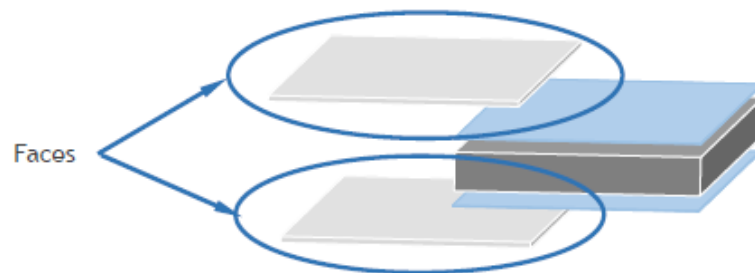
## **CAPÍTULO 3**

### **3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA FACE E DO NÚCLEO**

Este capítulo tem como foco os comportamentos mecânicos das estruturas materiais das peles, assim como do núcleo que constitui a estrutura sandwich. Isto alicerça os modelos constitutivos que iremos utilizar ao longo deste capítulo. Conforme os tipos de estruturas materiais, os comportamentos mecânicos vão variando. Abordar-se-á também, neste capítulo, uma espécie de descrição do comportamento da espuma de alumínio do núcleo e da chapa de alumínio das peles. Por fim, serão apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais, que serão utilizadas posteriormente na realização dos ensaios numéricos. Estas são aferidas através dos comportamentos mecânicos referidos anteriormente.

#### **3.1 Características mecânicas da chapa das faces**

A estrutura das faces de uma liga de alumínio é definida como sendo uma estrutura sólida homogênea plana com uma dada espessura.



*Figura 3.1 - Faces em chapa de alumínio da estrutura sandwich [1].*

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

Esta forma plana faz surgir estruturas metalúrgicas caracterizadas por apresentarem uma orientação preferencial, resultando esta do alongamento dos grãos na direção de laminagem com o objetivo de adaptar a deformação aplicada pelos rolos e da respetiva rotação. Esta orientação preferencial afeta o comportamento mecânico das fases, tal como as suas propriedades mecânicas [2].



*Figura 3.2 - Estrutura material da chapa [1].*

O comportamento mecânico da chapa de alumínio das faces encontra-se relacionada com o ensaio de tração por a execução ser mais simplificada e a reprodutibilidade dos resultados originam o ensaio de tração um dos ensaios mecânicos mais essenciais.

#### 3.1.1 Tração Uniaxial da Chapa das Faces

Quando se aplica uma força num corpo sólido, promove-se uma deformação do material no sentido dessa força, consistindo o ensaio de tração em sujeitar ao corpo sólido uma força que o tende a alongar. A realização do ensaio é efetuada com um corpo sólido, com determinadas dimensões. O provete é sujeito a um carregamento uniaxial, o qual dá origem à sua deformação. Para uma liga metálica, o gráfico da figura 3.3 representa a relação tensão deformação.



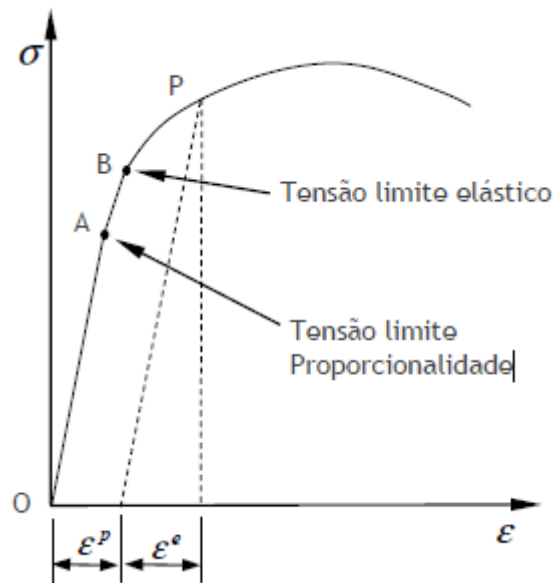


Figura 3.3 - Gráfico tensão-deformação de uma liga metálica [3].

O limite do comportamento linear representa-se no ponto A, tendo a tensão o nome de tensão limite de proporcionalidade, a partir do qual, normalmente, não é adequável a aplicação da lei de Hooke. O fenómeno da ausência de deformações pós carregamento designa-se por comportamento elástico, estando o limite elástico de comportamento do material reproduzido no ponto B, correspondendo-lhe a tensão limite elástico.

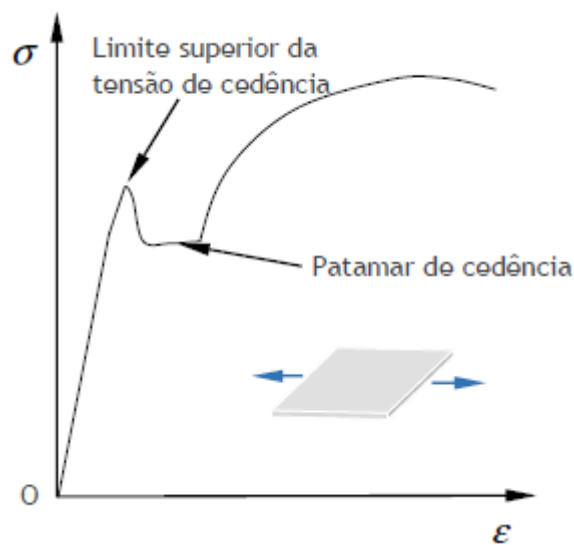


Figura 3.4 - Gráfico de tensão-deformação de uma liga metálica com patamar de cedência [2].

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

Existem diversos metais que apresentam, superficialmente, uma curva distinta da figura mostrada anteriormente (figura 3.4). Isto ocorre pelo motivo de alguns metais exibirem um valor de tensão, tensão limite superior da tensão de cedência, seguido de uma leve quebra. Posteriormente, averigua-se um aumento da deformação, mas este não associado à variação na tensão. Esta região do gráfico é, geralmente, reconhecida como patamar de cedência. Em seguida, o valor da tensão recupera uma variação crescente, designando-se este fenómeno como encruamento (endurecimento por deformação) do material.

Nos metais mais vulgares, a parcela da curva AB no gráfico da figura 3.3 é bastante reduzida, o que torna difícil distinguir entre tensão limite elástico e tensão limite de proporcionalidade. A diferença entre o valor tensão limite superior da tensão de cedência e o patamar da cedência (ou tensão de cedência), geralmente é reduzida pelo que é chamada por tensão de cedência,  $\sigma_{y0}$ . Como existem bastantes dificuldades em diferenciar no ensaio todos estes critérios, normalmente refere-se à tensão de cedência como a tensão necessária para provocar uma deformação plástica de 0,2%.

Quando o nível de carregamento origina um estado de tensão de valor superior ao valor da tensão de cedência (deformação plástica), o incremento de deformação plástica está associado ao respetivo aumento de tensão, ao qual se dá o nome de encruamento do material, figura 3.5 [3].

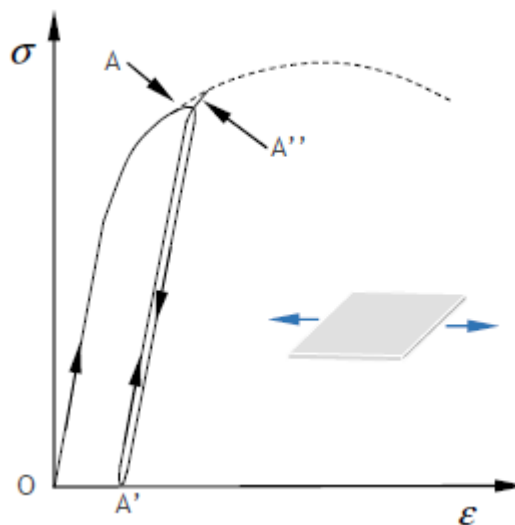


Figura 3.5 - Gráfico tensão-deformação com descarregamento e carregamento [3].

### 3.1.2 Modelo Elastoplástico das Faces

Os modelos constitutivos de materiais sólidos são expostos por um conjunto de inúmeras equações diferenciais, as quais têm o objetivo de descrever os comportamentos dos materiais quando submetidos a alguma espécie de sollicitação. Dependendo do tipo de material e do tipo de sollicitação, existem dois grupos essenciais: elastoplástico e elastoviscoplastico. O primeiro grupo considera que o comportamento do material não é dependente do tempo nem da velocidade de aplicação das forças (deslocamentos). Este modelo é utilizado para a descrição de problemas sujeitos a sollicitações estáticas ou quase estáticas. O segundo grupo, os modelos elastoviscoplasticos, pretendem traçar comportamentos dependentes do tempo, da fluência ou velocidades de deformação elevadas. O comportamento deste último modelo caracteriza-se por uma resposta do material. Inicialmente, um comportamento elástico e, posteriormente, um comportamento plástico, conforme um determinado nível de tensão [3].

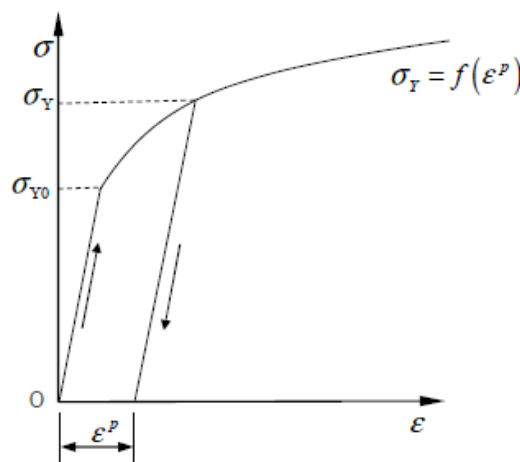


Figura 3.6 - Comportamento elastoplástico - modelo elastoplástico com endurecimento [3].

Como se verifica no modelo da figura, apresentando esta um modelo reológico unidimensional, ao qual se aplica uma força (e consequentemente uma tensão  $\sigma$ ), esta fazendo surgir um alongamento do modelo ( $\Delta l$ ), cujo resultado pode ser avaliado pela extensão causada:

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.1)$$

Com fundamento no comportamento elástico, e no comportamento plástico:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3.2)$$

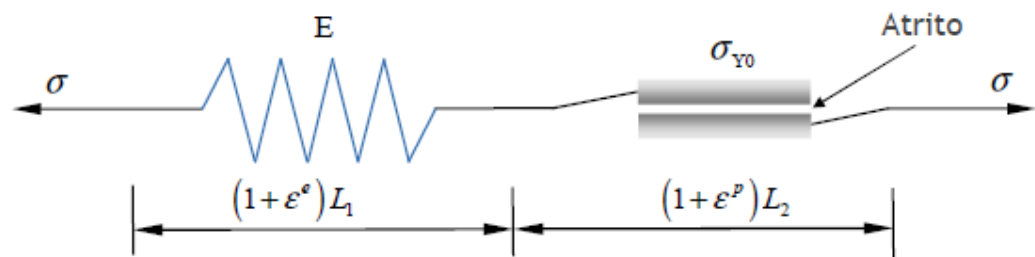


Figura 3.7 - Modelo reológico elastoplástico [2].

Quando ocorre uma extensão causada pela carga aplicada, o comportamento do material é elástico até um certo ponto (limite elástico) e a tensão que o provoca denomina-se tensão de limite elástico ou tensão de cedência  $\sigma_{y0}$ , após o qual, o material se apresenta deformado plasticamente. Para o modelo apresentado com um grau de liberdade, o comportamento linear elástico é caracterizado pela constante elástica da mola  $E$ , traduzindo-se pela expressão:

$$\sigma = E \times \varepsilon^e = E(\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (3.3)$$

A deformação plástica principia-se quando a tensão que se aplica atinge o valor de tensão de cedência. À forma como se determina o valor da tensão aplicada, de maneira a compará-lo com a tensão de cedência, dá-se a designação de critério de cedência. A tensão de cedência, na figura 3.7, diz respeito ao atrito entre as placas.

Uma vez alcançada a tensão de cedência, este valor pode (ou não), manter-se constante com o incremento de deformação. Assim, se esse valor não for dependente do aumento da extensão plástica, significa que o material tem um comportamento

completamente plástico. Por outro lado, se o valor da tensão de cedência aumentar com o incremento da extensão plástica, quer dizer que o material está a suportar um encruamento.

Os materiais modelados numericamente resultantes de deformações elastoplásticas apresentam diferenças por terem um comportamento sensivelmente linear elástico para deformações exíguas. Com base na teoria da elasticidade para estas diminutas deformações, existe o tensor das deformações, que pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\varepsilon = \nabla^s u = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.5)$$

onde  $\nabla u$  é o gradiente dos deslocamentos, e  $\nabla^s u$  a sua parte simétrica.

Considerando uma barra representada na figura 3.8, cujo eixo axial coincide com o eixo  $X = (1,0,0)$  e sobre a qual se tem como ponto de referência a partícula com a abcissa  ${}_1X$ , enquanto a extremidade esquerda coincide com a origem do referencial. Mantendo-se a extremidade esquerda fixa, aplica-se sobre a outra extremidade um esforço normal de tração. Por facilidade de exposição considera-se apenas as variáveis (e suas derivadas) relativas ao eixo coincidente com o eixo axial da barra passando a referida partícula a possuir abcissa  ${}_2X = {}_1X + {}_1u$ , pelo que sofreu um deslocamento na direção axial de  ${}_1u$ . Numa segunda fase aplica-se um segundo esforço normal de tração passando a partícula a ocupar a posição  ${}_3X = {}_2X + \Delta u = {}_1X + {}_2u$ , pelo que o ponto material sofreu um deslocamento de  $\Delta u$ .

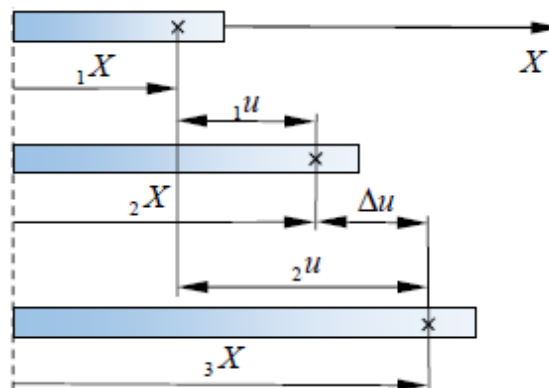


Figura 3.8 - Lei da decomposição [3].

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

Quanto à primeira fase da deformação, o gradiente de deformação, considerando a sua componente não nula, é apresentada:

$$F'_{1,1} = \frac{{}_2X}{{}_1X} = \frac{{}_1X + {}_1u}{{}_1X} = 1 + \frac{{}_1u}{{}_1X} \quad (3.6)$$

Relativamente à mesma componente, agora no que toca à segunda fase, considerando como configuração inicial, a configuração final da anterior fase, demonstra-se:

$$F''_{1,1} = \frac{{}_3X}{{}_2X} = \frac{{}_2X + \Delta u}{{}_2X} = 1 + \frac{\Delta u}{{}_2X} \quad (3.7)$$

Se a posição do ponto em  ${}_3X$ , fosse alcançada com apenas um incremento, o gradiente de deformação seria:

$$F_{1,1} = \frac{{}_3X}{{}_1X} \quad (3.8)$$

Se se multiplicar (3.6) por (3.7) obtém-se o mesmo resultado:

$$F_{1,1} = F'_{1,1} \times F''_{1,1} = \frac{{}_2X}{{}_1X} = \frac{{}_3X}{{}_2X} = \frac{{}_3X}{{}_1X} \quad (3.9)$$

A que corresponde a extensão total:

$$\varepsilon = \frac{{}_3X - {}_1X}{{}_1X} = \frac{{}_2u}{{}_1X} \quad (3.10)$$

Considerando as normas dos deslocamentos  ${}_1u$  e  ${}_2u$  muito reduzidas, quando comparadas com a dimensão  ${}_1X$ , a extensão em cada uma das fases é a seguinte:

$$\varepsilon' = \frac{{}_2X - {}_1X}{{}_1X} = \frac{{}_1u}{{}_1X} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon'' = \frac{{}_3X - {}_2X}{{}_1X} = \frac{\Delta u}{{}_1X} \quad (3.12)$$

Adicionando as extensões de cada fase resulta:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' = \frac{{}_2X - {}_1X}{{}_1X} + \frac{{}_3X - {}_2X}{{}_1X} = \frac{{}_3X - {}_1X}{{}_1X} = \frac{{}_2u}{{}_1X} \quad (3.13)$$

Assim, obtém-se o valor da extensão total calculado como se de uma só fase se tratasse.

À multiplicação efetuada em (3.9) dá-se o nome de lei da decomposição multiplicativa, enquanto a adição feita em (3.13) designa-se por lei da decomposição aditiva. O cálculo da extensão,  $\varepsilon$ ", apenas é válido para deformações pequenas, pelo que nestas poderá ser aplicada a lei da decomposição aditiva. Por outro lado, para grandes deformações, a lei multiplicativa pode trazer mais vantagens.

Fazendo coincidir a primeira fase com o domínio elástico, vindo a segunda fase a ocorrer no domínio plástico, ter-se-á formalmente para o Tensor das deformações  $\varepsilon$ , e para o gradiente de deformação,  $F$ :

$$F = F^e F^p \quad (3.14)$$

$$F_{i,j} = F_{i,j}^e F_{j,i}^p \quad (3.15)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (3.17)$$

Numa formação elastoplástica de pequenas deformações, normalmente decompõem-se o tensor das extensões numa componente elástica e numa componente plástica. Assim, torna-se oportuno estabelecer modelos matemáticos, os quais traduzam fenómenos físicos, separadamente, de elasticidade e da plasticidade.

É com base na teoria da elasticidade que se descreve o comportamento elástico, tendo agora interesse determinar o modelo matemático para a componente plástica das deformações.

#### 3.1.3 Função de cedência

O comportamento plástico surge e limita-se por um critério de cedência, que pode ser formulado da seguinte maneira:

$$F(\sigma, \alpha') = 0 \quad (3.18)$$

Em  $\alpha'$  que representa um conjunto de variáveis de endurecimento e  $\sigma$  é o tensor das tensões. Se estiver em causa um material isotrópico, em que a cedência plástica dependa apenas da grandeza das tensões principais, a função escalar  $F$  só depende de um valor escalar, ou seja, de um critério de encruamento -  $\alpha$ :

$$F(\sigma, \alpha) = f(\sigma) - \sigma_y(\alpha) = 0 \quad (3.19)$$

Em que  $f(\sigma)$  representa a função de cedência. Esta pode ser formulada por várias formas analíticas com representação geométrica no espaço distintas.

Atendendo a (3.19) verifica-se que, se num certo ponto de um corpo material deformável, se apurar a inequação  $f(\sigma) < \sigma_y(\alpha)$ , o corpo apresentará nesse determinado



ponto um comportamento elástico. Contrariamente, se se confirmar a igualdade  $f(\sigma)=\sigma_y(\alpha)$ , o comportamento já será plástico. Alcançado este estado, o comportamento posterior desse ponto material, será limitado pela variação de  $f$  em relação a  $\sigma$ ,

$$df = \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T d\sigma + \dots \quad (3.20)$$

Em que  $\partial f / \partial \sigma$  é um vetor normal à superfície de cedência, estando as componentes do tensor das tensões reunidas sob a forma de um vetor ( $\sigma$ ), assim como as suas variações ( $d\sigma$ ) [3].

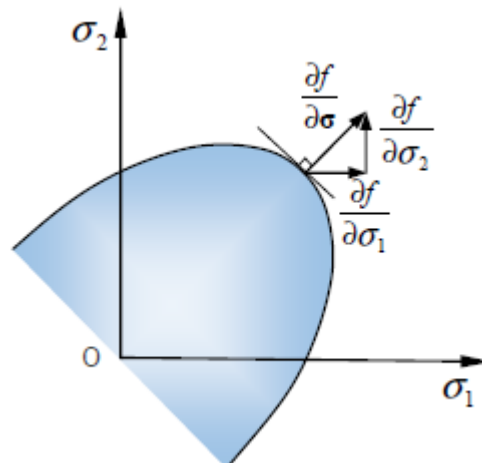


Figura 3.9 - Condição de ortogonalidade no espaço das tensões  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  [3].

Como conclusão, apreendemos o seguinte:

- Se  $df < 0$ , indica que se está perante uma situação de descarregamento elástico. O estado de tensão situa-se no interior da superfície de cedência, retomando o material, um comportamento elástico;
- Se  $df = 0$ , indica que o estado de tensão atingiu a superfície de cedência, o que corresponde a um regime plástico, se o material apresentar comportamento perfeitamente plástico (a constante);

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

- Se  $df > 0$ , indica que o estado de tensão se mantém sobre a superfície de cedência, não se mantendo esta constante. É o que acontece no comportamento dum material com encruamento.

#### 3.1.4 Critério de Cedência de Von Mises

Von Mises, em 1913, criou um critério de cedência. Este defende que a cedência ocorre quando o segundo invariante das tensões de desvio  $J_2$  alcança um valor crítico:

$$\sqrt{J_2} - \frac{1}{2}\Phi(\alpha) = 0 \quad (3.21)$$

Em que  $\Phi(\alpha)$  dependente do critério de endurecimento e  $\alpha$  é o raio da superfície de cedência. Com esta dependência de  $J_2$ , a teoria da plasticidade que aplica em conjunto este parâmetro com a lei associativa, é conhecida como a teoria do escoamento  $J_2$ . O critério criado por Von Mises é representado e compara-se com o critério de Tresca na figura 3.10.

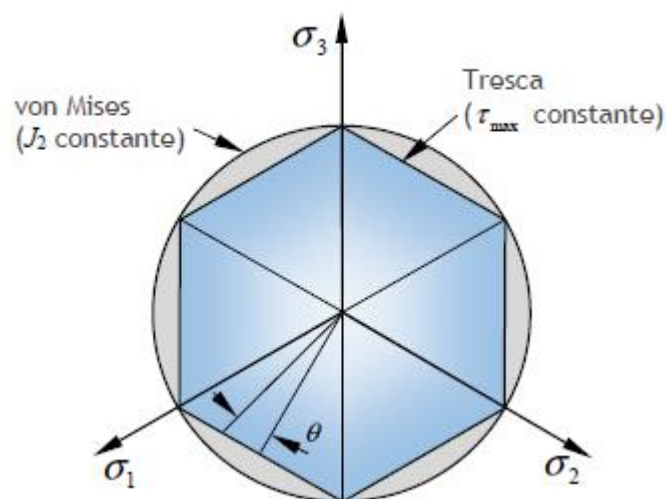


Figura 3.10 - Representação das superfícies dos critérios de Tresca e de Von Mises [2].

Pelo ensaio de tração,  $\Phi(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y$ , pelo que a tensão efetiva, ou a chamada de tensão de Von Mises,  $\bar{\sigma}$ , em termos do tensor das tensões de desvio é dada por  $\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2}S:S} = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}:S_{ij}}$ , sendo que para este tipo de material das faces a deformação plástica não depende da pressão hidrostática e o critério pode ser escrito da seguinte forma:

$$F(\sigma, \alpha) = \sqrt{\frac{3}{2}S:S} - \sigma_y(\alpha) = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}:S_{ij}} - \sigma_y(\alpha) \quad (3.22)$$

### 3.1.5 Regra do Encruamento

Para que um novo escoamento plástico possa ocorrer, a regra do encruamento estabelece determinadas condições, após se atingir o estado plástico do material. Esta situação verifica-se através da superfície de cedência poder sofrer várias e sucessivas alterações, consoante se dá o escoamento plástico.

Na expressão (3.18) introduziu-se um conjunto de variáveis de endurecimento reunidas num vetor,  $\alpha'$ . Existem dois tipos de aproximações para a dependência de qualquer variável interna de endurecimento  $\alpha'_i \in \alpha'$ , ( $1 \leq i \leq n_{\text{endurecimento}}$ )[11]:

- i. Se uma variável de endurecimento depende de deformação plástica efetiva, significa que  $\alpha'_i = \alpha'_i(\bar{\epsilon}^P)$  ocorre deformação com encruamento. Assim, a deformação plástica efetiva  $\bar{\epsilon}^P$  define-se da seguinte forma:

$$\bar{\epsilon}^P = \sqrt{\frac{2}{3}\epsilon^P:\epsilon^P} = \sqrt{\frac{2}{3}\epsilon_{i,j}^P:\epsilon_{i,j}^P} \quad (3.23)$$

Esta deformação plástica efetiva diz respeito ao processo de deformação plástica, estabelecendo que o endurecimento é definido por cada parcela infinitesimal de deformação plástica, e não simplesmente pelo seu estado inicial e final:

$$\bar{\varepsilon}^P = \int d\bar{\varepsilon}^P = \int_0^t \frac{d\bar{\varepsilon}^P}{dt} = \int_0^{\varepsilon_{ij}^P} \left( \frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^P : d\varepsilon_{ij}^P \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

- ii. Existe também, o endurecimento energético que relaciona a variável de endurecimento com o trabalho plástico total  $\alpha'_i = \alpha'_i(w^P)$ , em que:

$$w^P = \int_0^{\varepsilon_{ij}^P} \sigma : d\varepsilon^P = \int_0^{\varepsilon_{ij}^P} \sigma_{ij} : d\varepsilon_{ij}^P \quad (3.25)$$

De acordo com Nayak e Zienkiewicz, os dois modelos de endurecimento já descritos acima são idênticos, o que quer dizer que, as curvas que são obtidas através do ensaio de tração traduzem o mesmo escalão de encruamento, isto nos casos de materiais em que se possa aplicar o critério de Von Mises.

A variação da superfície de cedência, pode ser caracterizada, segundo três modelos:

- Se a superfície de cedência subsequente, provocada pelo incremento de deformação plástica, e exclusivamente uma expansão uniforme da superfície de cedência precedente, o modelo de encruamento é designado de isotrópico. Para o caso bidimensional, exemplifica-se na Figura 3.11 a). Este modelo, proposto por Odquist apresenta como principal vantagem, a sua simplicidade, não conseguindo, no entanto, reproduzir determinados aspetos reais da deformação de alguns materiais, como por exemplo o efeito de Bauschinger [5-7].
- Se a superfície de cedência subsequente, mantiver a mesma forma, mas simplesmente for transladada no espaço das tensões como um corpo rígido, o tipo de encruamento diz-se cinemático (Figura 3.11 b)). Este modo de encruamento, apresentado inicialmente por Prager, surgiu com o objetivo de modelar um fenómeno bem visível experimentalmente, o efeito de Bauschinger, muito corrente em materiais sujeitos a regimes de carregamento cíclico [8,9].
- Endurecimento distorcional, em que se admite a expansão, a translação e a rotação da superfície de cedência, ou inclusive a mudança de forma [10].

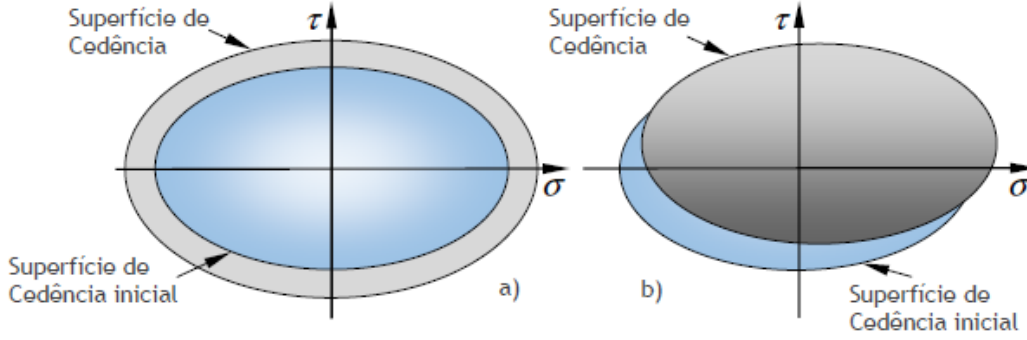


Figura 3.11 - a) Encruamento isotrópico; b) Encruamento cinemático [3].

De forma a modelar matematicamente os primeiros dois modelos de encruamento, é admitido que a escolha das variáveis de endurecimento no vetor  $\alpha'$  possa ser:

$$\alpha'^T = \{\bar{\epsilon}^P, \sigma^b(\bar{\epsilon}^P)\} \quad (3.26)$$

Em que, o valor da deformação plástica efetiva  $\bar{\epsilon}^P$  é satisfatório para o significado de qualquer tipo de endurecimento isotrópico, já o tensor das tensões de recuperação, é realmente indispensável para descrever o endurecimento cinemático. A tensão de recuperação analisa-se segundo a translação no espaço das tensões do centro da superfície de cedência, apresentando iguais dimensões do tensor das tensões.

A expressão (3.19) pode ser reformulada, adicionando o encruamento cinemático e assumindo para o endurecimento isotrópico, a igualdade  $\alpha = \bar{\epsilon}^P$ , resultando:

$$F(\sigma, \alpha') = f\left(\sigma - \sigma^b(\bar{\epsilon}^P)\right) - \sigma_y(\bar{\epsilon}^P) = 0 \quad (3.27)$$

Com base em (3.27), é importante definir as leis para o encruamento isotrópico e cinemático. Para o primeiro, pode admitir-se uma função que depende do valor de início da plastificação  $\sigma_{y0}$  e de uma função dependente de deformação plástica efetiva [21]:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + h(\bar{\epsilon}^P) \quad (3.28)$$

Da lei do encruamento isotrópico resulta:

$$d\sigma_y = H'(\bar{\epsilon}^P)d\bar{\epsilon}^P \quad (3.29)$$

Em que,  $H'$  é a derivada da função geral  $h$ , em relação a  $\bar{\varepsilon}^P$ .

Apesar do comportamento perfeitamente plástico, ou seja,  $h \equiv 0$ , admite-se geralmente, mais duas hipóteses [11]:

$$\sigma_y = \sigma_{Y_0} + H(\bar{\varepsilon}^P) \quad (3.30)$$

$$\sigma_y = \sigma_{Y_0} + (H_\infty - \hat{H}_0)(1 - e^{(-n_\varepsilon \bar{\varepsilon}^P)}) \quad (3.31)$$

Em que,  $H$ ,  $H_\infty$ ,  $H_0$  e  $n_\varepsilon$  se apresentam como constantes do material.

#### 3.1.6 Anisotropia das Ligas de Alumínio

Geralmente, as ligas metálicas para solicitações de tração têm o comportamento já acima descrito. Todavia, quando estão em causa ligas de alumínio sob a forma plana, a orientação preferencial que resulta do processo de laminagem, faz surgir uma mutabilidade das propriedades mecânicas em direções diversas relativamente a essa orientação preferencial. A este fenómeno designa-se anisotropia. Anisotropia está normalmente, presente no comportamento mecânico das ligas de alumínio sob forma de chapa. Este fenómeno pode ser classificado através de vários critérios, sendo um deles o coeficiente de anisotropia  $r$ , o qual indica a distribuição de deformações quando o respetivo material é solicitado à tração uniaxial.

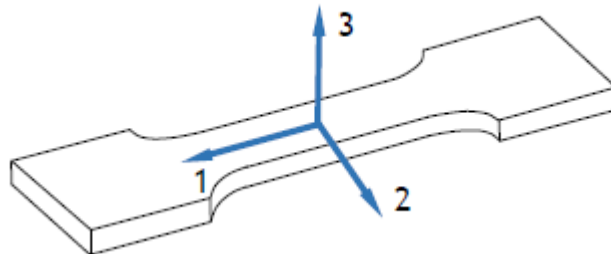


Figura 3.12 - Direções principais de um provete de tração para o cálculo dos coeficientes  $r$  [1].

$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} \quad (3.32)$$

O coeficiente de anisotropia resulta da razão entre a deformação segundo a direção transversal à direção de solicitação,  $\varepsilon_2$  e a deformação segundo a espessura  $\varepsilon_3$ , figura 3.12. Para analisar a anisotropia no plano da chapa, terá de se calcular a variação de  $r$  com o ângulo  $\alpha$ , entre a direção de ensaio e a direção de laminagem, figura 3.13 [12].

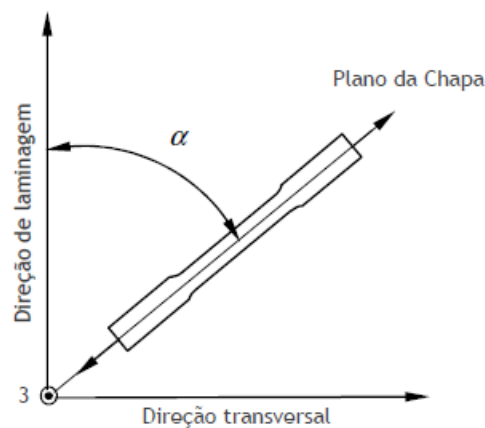


Figura 3.13 - Referencial usado para uma chapa para definição de diferentes ângulos  $\alpha$ .

#### 3.1.6.1 Critério de Hill

Este critério é bastante utilizado de uma perspetiva numérica para representar a anisotropia planar, articulada, em especial, a processos de embutidura. Serve também, para descrever fenómenos de plasticidade anisotrópica de aços, sendo considerado um critério polifacetado pela sua simplicidade e facilidade de aplicação a qualquer estado de tensão [13].

Hill, em 1948, criou uma função simples, que desenvolveu através do critério de Von Mises, conseguindo representar o comportamento de materiais ortotrópicos. A função de cedência pode ser formulada da seguinte forma (considerando o sistema de eixos de coordenadas coincidente com os eixos ortotropia):

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \bar{\sigma}^2 \quad (3.33)$$

Os pontos F, G, H, L, M e N representam constantes do material que podem ser obtidas experimentalmente,  $\sigma_{ii}$  e  $\sigma_{ij}$  as componentes do tensor das tensões de Cauchy, no sistema de eixos principal e  $\bar{\sigma}$  reproduz a tensão equivalente.

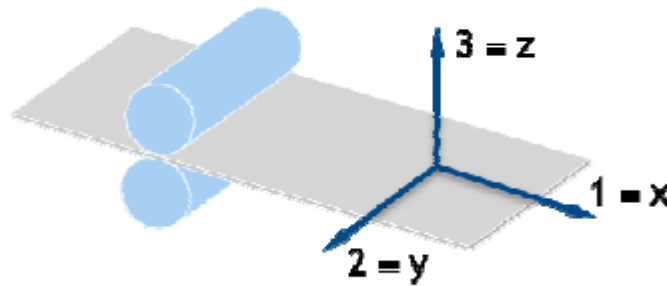


Figura 3.14 - Sistema de coordenadas - chapa laminada [1].

#### 3.1.6.2 Critério de Hill – Anisotropia Planar

Tratando-se de um estado plano de tensão, as equações reproduzidas anteriormente podem ser simplificadas para o estudo de estruturas laminadas do tipo chapa. Fazendo coincidir a direção 1 com a direção de laminagem, a direção 2 com a direção transversal a direção de laminagem e a direção 3 perpendicular ao plano chapa, figura 3.14 Definido o sistema de coordenadas é possível definir o estado plano de tensão típico usado em problemas de deformação de placas finas como sendo:  $\sigma_{33} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$  a equação (3.33) virá:

$$(G + H)\sigma_{11}^2 + (F + H)\sigma_{22}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + 2N\sigma_{12}^2 = \bar{\sigma}^2 \quad (3.34)$$

No caso de um ensaio de tração de um provete em que o seu eixo se situa no plano da chapa e faz com a direção de laminagem um ângulo (Figura 3.13), e possível descrever, com base na equação (3.34), a evolução da tensão limite de elasticidade em função do ângulo  $\alpha$  [13].



$$\sigma_0(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha + H(2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}} \quad (3.35)$$

As relações tensão - deformação em regime plástico são obtidas a partir da lei de plasticidade associada ou lei da normalidade, assumindo que o incremento infinitesimal de deformação plástica,  $d\varepsilon_{ij}$ , é sempre perpendicular a superfície de plasticidade, qualquer que seja a orientação do incremento infinitesimal de tensão,  $d\sigma_{ij}$ , para fora desta superfície [19]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial(\sigma_{ij})} \quad (3.36)$$

A equação anterior, aplicada ao critério anisotrópico de Hill, conduz as seguintes relações tensão – deformação em regime plástico:

$$\begin{cases} d\varepsilon_{11}^p = d\lambda[H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) + G(\sigma_{11} - \sigma_{33})] \\ d\varepsilon_{22}^p = d\lambda[H(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{22} - \sigma_{11})] \\ d\varepsilon_{33}^p = d\lambda[H(\sigma_{33} - \sigma_{11}) + G(\sigma_{22} - \sigma_{33})] \\ d\varepsilon_{23}^p = d\lambda L \sigma_{23} \\ d\varepsilon_{13}^p = d\lambda L \sigma_{13} \\ d\varepsilon_{12}^p = d\lambda L \sigma_{22} \end{cases} \quad (3.37)$$

Define-se coeficiente de anisotropia de uma chapa para um dado  $r(\alpha)$ , como sendo a razão entre nas deformações plásticas perpendiculares, durante o ensaio de tração. Para um provete, cujo  $\alpha = 0^\circ$  e dado por:

$$r_0 = \frac{d\varepsilon_{22}^p}{d\varepsilon_{33}^p} = \frac{H}{G} \quad (3.38)$$

para a direção  $90^\circ$

$$r_{90} = \frac{d\varepsilon_{11}^p}{d\varepsilon_{33}^p} = \frac{H}{F} \quad (3.39)$$

para a direção  $45^\circ$

$$r_{45} = \frac{2N - (F + G)}{2(F + G)}; \frac{N}{G} = \left(r_{45} + \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{r_0}{r_{90}}\right) \quad (3.40)$$

Com a realização de ensaios de tração com provetes com uma direção de  $\alpha=0$ ,  $\alpha=45$  e  $\alpha=90$  é possível obter os coeficientes de anisotropia ou Lankford's  $r$ -value, ou ainda taxa de deformação plástica.

A utilização deste critério em “ABAQUS” implica a obtenção dos coeficientes de cedência anisotrópicos  $R_{ij}$ , obtidos através dos coeficientes Lankford's  $r$ -value. Considerando os Lankford's  $r$ -value e que apenas existe anisotropia planar  $R_{11}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{33}$  podem ser calculados através de:

$$R_{11} = 1 \quad (3.41)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_y(r_x + 1)}{r_x(r_y + 1)}} \quad (3.42)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_y(r_x + 1)}{(r_x + r_y)}} \quad (3.43)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3r_y(r_x + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_x + r_y)}} \quad (3.44)$$

Segundo a versão implementada no “ABAQUS” [14] e descrita no manual, a função de cedência do critério de Hill e dada por:

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (3.45)$$

Com os parâmetros  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$  são as constantes do material que podem ser obtidas experimentalmente. Se  $\bar{\sigma}_{11}$ ,  $\bar{\sigma}_{22}$ , e  $\bar{\sigma}_{33}$  representarem as tensões de cedência para as respectivas direções 1,2,3, podendo as constantes de  $F$ ,  $G$  e  $H$  ser calculadas segundo:

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (3.46)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (3.47)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (3.48)$$

E  $L$ ,  $M$  e  $N$  por:

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (3.49)$$

$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (3.50)$$

Sendo  $\sigma^0$  a tensão de cedência,  $R_{11}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{33}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{23}$ , são os coeficientes de cedência anisotrópicos e  $\tau^0 = \sigma^0 / \sqrt{3}$ .

A regra do escoamento pode ser expressa:

$$d\varepsilon^P = d\gamma \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{d\gamma}{f} b \quad (3.51)$$

Por definição de  $f$ ,

$$b = \begin{bmatrix} -G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) + H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ -F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) \\ 2N\sigma_{12} \\ 2M\sigma_{31} \\ 2L\sigma_{23} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

### 3.1.6.3 Critério Barlat 91

O critério de Hill apresentado anteriormente conduz a bons resultados relativamente à anisotropia planar de aços, sendo um critério que pode ser aplicado a diversos materiais o que não acontece com o critério de Barlat que é utilizado para descrever a anisotropia em ligas de alumínio [27, 28].

De todos os critérios para descrever o comportamento anisotrópico das ligas de alumínio, foi utilizado e aplicado o critério de Barlat 91. Para este e para um estado tridimensional de tensão, a função de cedência  $\Psi$  é dada por:

$$\Psi = |s_1 - s_2|^m + |s_2 - s_3|^m + |s_3 - s_1|^m = 2\hat{\sigma}^m \quad (3.53)$$

Onde  $S_i = 1, 2, 3$  são os valores próprios do equivalente plástico isotrópico do tensor das tensões de desvio  $S$ , obtidos em relação as componentes da tensão de Cauchy  $\sigma$  através de uma transformação linear, o expoente  $m$  e o parâmetro associado ao tipo de estrutura da liga, que no caso de uma estrutura cubica de faces centradas é igual a 8 e por fim  $\hat{\sigma}$  representa o equivalente de tensão. A transformação linear para o cálculo do equivalente plástico isotrópico do tensor das tensões de desvio  $S$  é dada por:

$$S = L : \sigma \quad (3.54)$$

Com  $L$  sendo o tensor de transformação linear, definido para materiais ortotrópicos por:

$$L = \begin{bmatrix} (C_2 + C_3)/3 & -C_3/3 & -C_2/3 & 0 & 0 & 0 \\ -C_3/3 & (C_3 + C_1)/3 & -C_1/3 & 0 & 0 & 0 \\ -C_2/3 & -C_1/3 & (C_1 + C_2)/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_6 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

onde as constantes  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  e  $C_6$  são os parâmetros que descrevem a anisotropia. Quando os parâmetros  $C_{i=1\sim6} = 1$  (material isotrópico) e  $m = 2$  este critério reduz-se ao critério de Von Mises. A aplicação do Yid91 a chapas finas leva a que apenas as constantes  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_6$  sejam consideradas como parâmetros de entrada do critério, uma vez que  $C_4 \equiv C_5 \equiv 1$  são parâmetros relativos ao corte na espessura da chapa, que por ser fina é considerada isotrópica nessa direção.

A superfície de cedência é descrita por:

$$\Psi = \hat{\sigma} - Y = 0 \quad (3.56)$$

Onde  $Y$  é a tensão de cedência, que toma inicialmente o valor de  $Y_0$ , sendo a sua evolução dada pela lei de Voce. Em termos de endurecimento o modelo usa um modelo de endurecimento cinemático proposto por Lemaitre and Chaboche.

### 3.2 Características Mecânicas da Espuma do Núcleo

No capítulo 2 foi abordada a questão da estrutura de espuma do núcleo. Esta estrutura é uma estrutura de arranjos tridimensionais de células, que podem ser de célula aberta ou de célula fechada. Estes materiais apresentam um grau de especificidade intrínseca à estrutura porosa, o que leva a uma classificação mais difícil quando é comparada, por exemplo, com uma estrutura sólida homogénea das faces.

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo



Figura 3.15 - Núcleo em espuma de metálica da estrutura sandwich [1].

Dependendo dos processos de fabrico das espumas, a nível comercial, existem várias marcas destas como por exemplo Shinko (Alporas), Mepura (Alulight), Cymat. Como demonstra a figura 3.16, as estruturas, as dimensões das células, as espessuras da parede, os materiais variam conforme as marcas dos produtos [15].

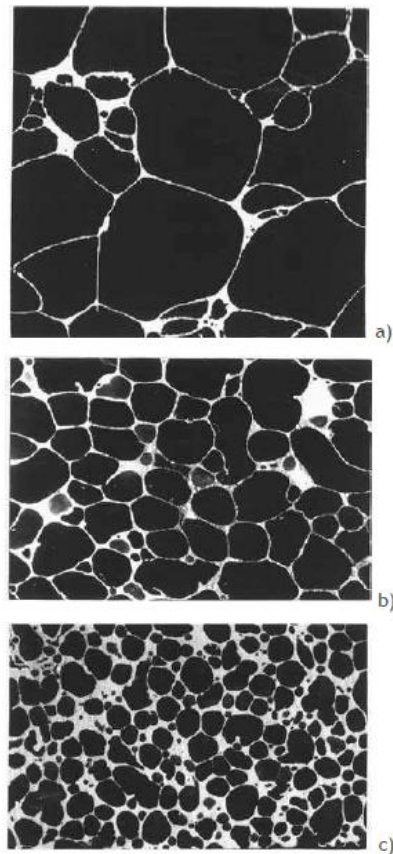


Figura 3.16 - Estrutura material da espuma do tipo; a) Cymat com uma densidade relativa de 0,04; b) Alporas com uma densidade relativa de 0,09; c) Alulight com uma densidade relativa 0,25 [15].

As espumas podem resultar de qualquer espécie de material, como materiais poliméricos, cerâmicos, metais, compósitos e, por isso, as suas respetivas propriedades mecânicas, assim como o seu comportamento mecânico e a disposição espacial desse material variam segundo o material que se utiliza. De acordo com a disposição espacial

do material, as mais usuais são a topologia celular (células abertas, células fechadas), a densidade relativa ( $\rho/\rho_s$ ), a forma da célula, a anisotropia. Os vários comportamentos mecânicos de uma espuma resultam da influência do material usado, mas também, estão relacionados, especialmente, com as propriedades da disposição espacial do material decorrente dos diversos processos de fabrico [15].

### 3.2.1 Densidade da Espuma

As espumas metálicas são consideradas como materiais celulares e são assim, definidas pela baixa fração do sólido, em volume, o que faz com que a densidade relativa ( $\rho/\rho_s$ ) constitua uma das propriedades fundamentais ligada a esta espécie de estruturas. Esta densidade caracteriza-se como um quociente entre a densidade da espuma ( $\rho_s$ ) e a densidade do material sólido de base ( $\rho$ ), que forma as células de estrutura. A porosidade é representada por  $1 - \rho/\rho_s$ . Esta propriedade tem uma relevância importantíssima a nível de condicionamento do uso de espuma metálica numa aplicação em benefício de outros materiais já utilizados [16].

### 3.2.2 Propriedades Mecânicas da Espuma

O comportamento mecânico das espumas metálicas, assim como a análise das respetivas propriedades mecânicas apresenta-se muito complexo. As propriedades mecânicas estão associadas às propriedades do material metálico que faz parte das células, mas também estão ligadas à disposição espacial do material, como a sua densidade, a espessura da parede, entre outros aspetos [15, 16].

#### 3.2.2.1 Módulo de Young da Espuma

Este módulo pode também ser designado como o módulo de elasticidade e caracteriza-se, essencialmente, como uma propriedade mecânica medida segundo a inclinação inicial

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

da curva de tensão-deformação, estando associada à força de ligação entre os próprios átomos do material. Quando está em causa espumas metálicas, esta propriedade encontra-se relacionada com a porosidade e densidade respetiva. A figura 3.17 representa a variabilidade de espumas metálicas consoante as diversas marcas existentes, suas densidades e de que modo altera o módulo de Young de uma estrutura porosa metálica [15].

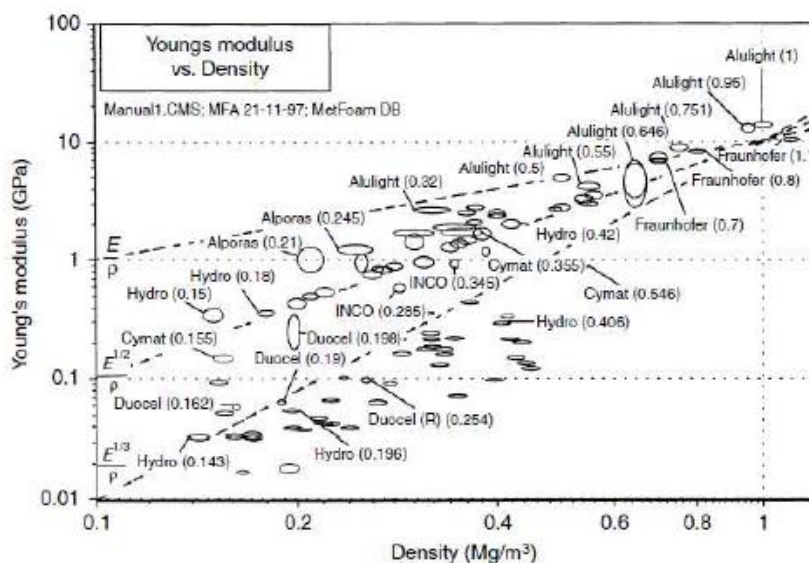


Figura 3.17 - Variabilidade do módulo de Young com a densidade para diferentes espumas [15].

#### 3.2.2.2 Efeito do Tamanho da Espuma

O tamanho da amostra na determinação das propriedades mecânicas é um item essencial para os materiais porosos. A relação entre a dimensão das células e o tamanho da amostra, o estado da superfície e a forma como esta está associada a outras superfícies são aspetos fundamentais para determinar a sua rigidez e resistência.

Para as situações de compressão, flexão e ensaios de tração analisa-se um decréscimo dos módulos medidos com a diminuição da dimensão da amostra. A superfície de corte de uma espuma suspende as ligações que anteriormente existiam entre as células. E por isso, observa-se a presença de uma banda de material à superfície mais fragilizado do que a restante espuma. Deste modo, quanto menor for a amostra do material que se utilizou, mais este efeito se torna evidente, uma vez que a relação volume fragilizado/volume total apresenta-se mais elevada.



Por outro lado, nos ensaios de corte a diminuição da amostra de material verifica-se o incremento do módulo de rigidez ao corte. Este resultado pode depender da maneira como se fixam as superfícies às placas de aplicação de força. A espuma é fixada através de um adesivo que corresponde ao encastramento das superfícies. Desta fixação surge uma banda de material mais rígida ao corte. Portanto, quanto menor for a amostra, maior se mostra a contribuição desta zona de maior rigidez. Estas consequências resultantes da forma nas propriedades do material são abordadas por Tekoglu [17].

Para que este efeito seja menor, as amostras devem ter tamanhos superiores à dimensão das células, nos ensaios de tração e compressão. Nos ensaios de corte, devem ser três vezes superiores. Os resultados também dependem de certa forma, da qualidade de superfície dos provetes, sendo, portanto, altamente recomendável que os provetes sejam maquinados com técnicas especiais, já demonstradas no capítulo 2.

### 3.2.2.3 Compressão Uniaxial da Espuma

As espumas metálicas representam uma curva tensão/deformação resultado de uma compressão uniaxial visível na figura 3.18.

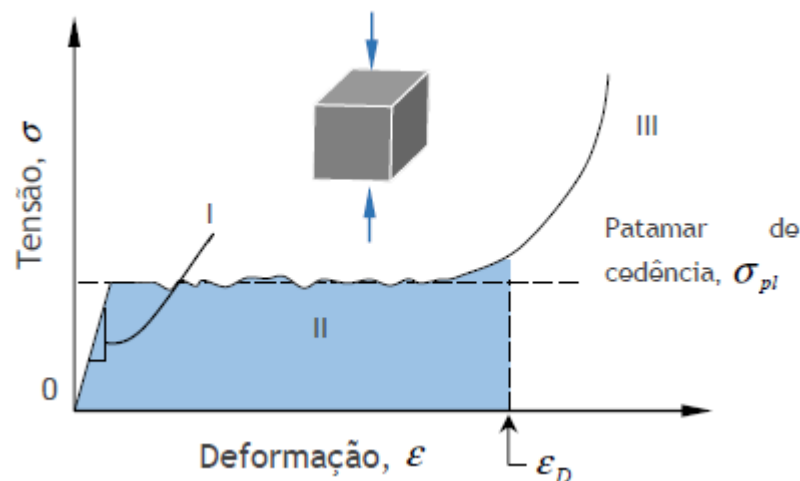


Figura 3.18 - Curva típica à compressão para espumas metálicas [15].

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

As características dos ensaios uniaxiais de compressão de materiais celulares são expressas através desta curva, podendo ser distinguidas três fases diversas:

- I. Na primeira fase, o material deforma-se, especialmente, de forma elástica, apresentando uma evolução linear das tensões com as deformações. O mecanismo de deformação da espuma é dependente da topologia das células. Relativamente às espumas de baixa densidade e células abertas, esta deformação elástica é resultado da flexão das uniões celulares. Quanto mais a densidade aumenta, mais relevante é a contribuição da extensão ou compressão das uniões celulares, figura 3.19- a), b), e c). Nas células fechadas, o material na união das células dobra e estende e as respetivas membranas constituintes das paredes celulares são comprimidas, o que leva a uma rigidez devido à contribuição das paredes, ver figura 3.19- d) e e). Se não houver rotura das membranas celulares, a compressão do ar capturado no seu interior também contribui para um incremento da rigidez, efeito que mais se verificará em materiais poliméricos, figura 3.19- f). A resistência à compressão de uma espuma corresponde ao ponto inicial de tensão no caso de esta existir. Contudo, se se verificar o contrário, admite-se que é a interceção das duas pseudo-retas (a correspondente ao carregamento inicial e a correspondente a tensão de colapso do material ‘plateau stress’).

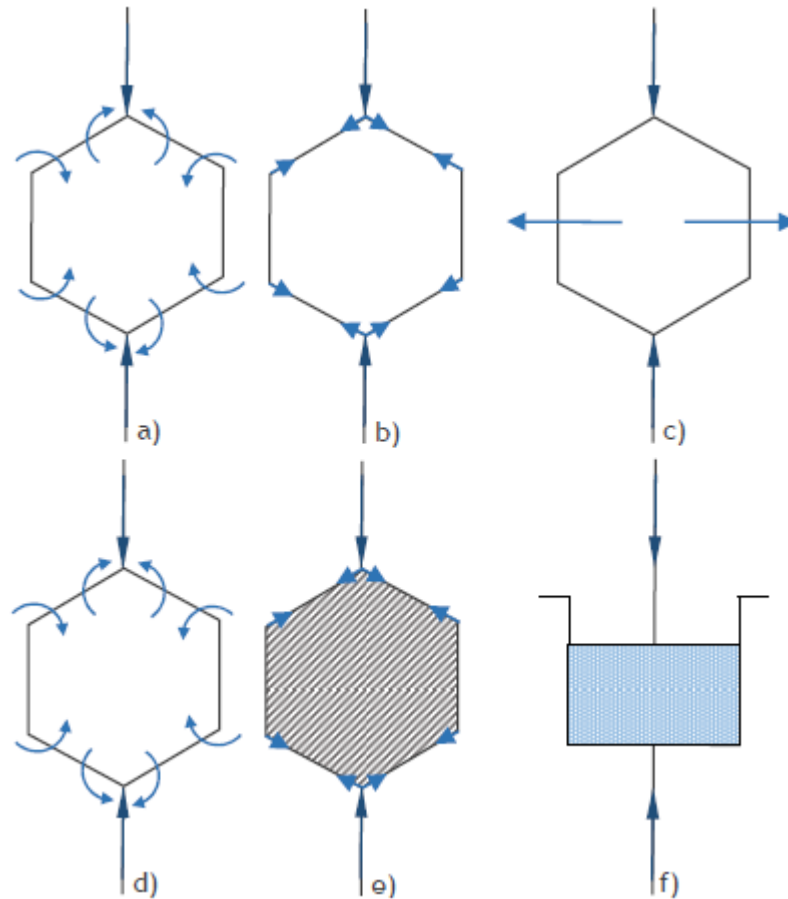


Figura 3.19 - Mecanismos de deformação à compressão, células abertas a), b) e c), célula fechada d), e) e f) [15, 17-18].

- II. Na segunda fase assume-se um patamar de tensão essencialmente constante. Esta região diz respeito ao colapso das células. O colapso é dependente do material base da espuma, podendo este ser frágil ou plástico. Este fenómeno ocorre quando a tensão ultrapassa um determinado valor e se passa num plano perpendicular à direção do carregamento. A zona do colapso propaga-se segundo o material à medida que a deformação aumenta. O colapso plástico em espumas elastoplásticas origina uma evolução praticamente horizontal na curva do ensaio tensão-deformação. É este um aspeto relevante dos materiais celulares, sendo que é muito utilizada nos elementos para absorção de energia.

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

- III. Nesta última fase, a curva do ensaio de compressão relaciona-se com a densificação do material. Na proporção que a deformação aumenta, as células das paredes tendem a aproximar-se e entram em contacto, conduzindo a um aumento acentuado das tensões com o aumento das deformações.

O atrito entre as placas de carregamento e a superfície da espuma provocam deformações localizadas, assim como valores de resistência à compressão inferiores. Deve-se, portanto proceder a uma lubrificação ou então, utilizar-se superfícies com baixos coeficientes de atrito [15].

#### 3.2.2.4 Tração Uniaxial da Espuma

O gráfico seguinte representa a curva relativa à tração para uma espuma metálica, em termos tensão-deformação.

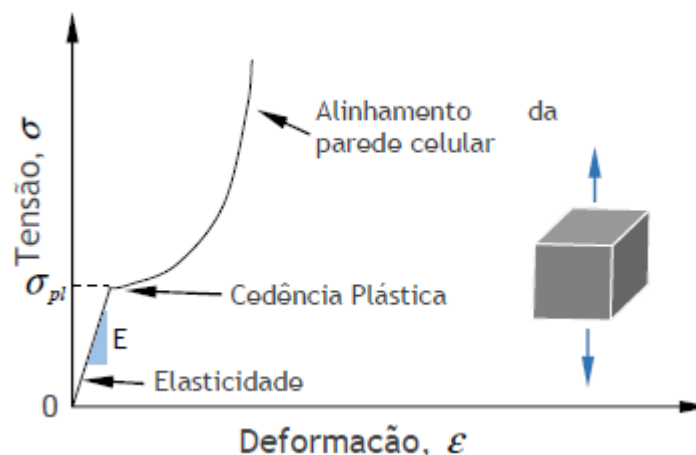


Figura 3.20 - Curva típica à tração para espumas metálicas [15].

A consequência a uma solicitação de tração é, primeiramente, linearmente elástica pelo motivo da flexão das paredes das células, mecanismo o qual é igual ao que resulta em compressão. Quando estão em causa materiais bastante elásticos, consoante a deformação aumenta, as paredes das células vão sofrendo rotações de modo a alinharem-se com a direção de aplicação da tensão. Estas rotações fazem originar um incremento na rigidez da espuma até ao momento em que se verifica a rotura. Não se passa o mesmo nas espumas de alumínio. À tração apresentam uma rotura frágil, em geral, que não demonstra quase nenhuma deformação plástica. As deformações à cedência são baixas, normalmente 0.2 a 2%.

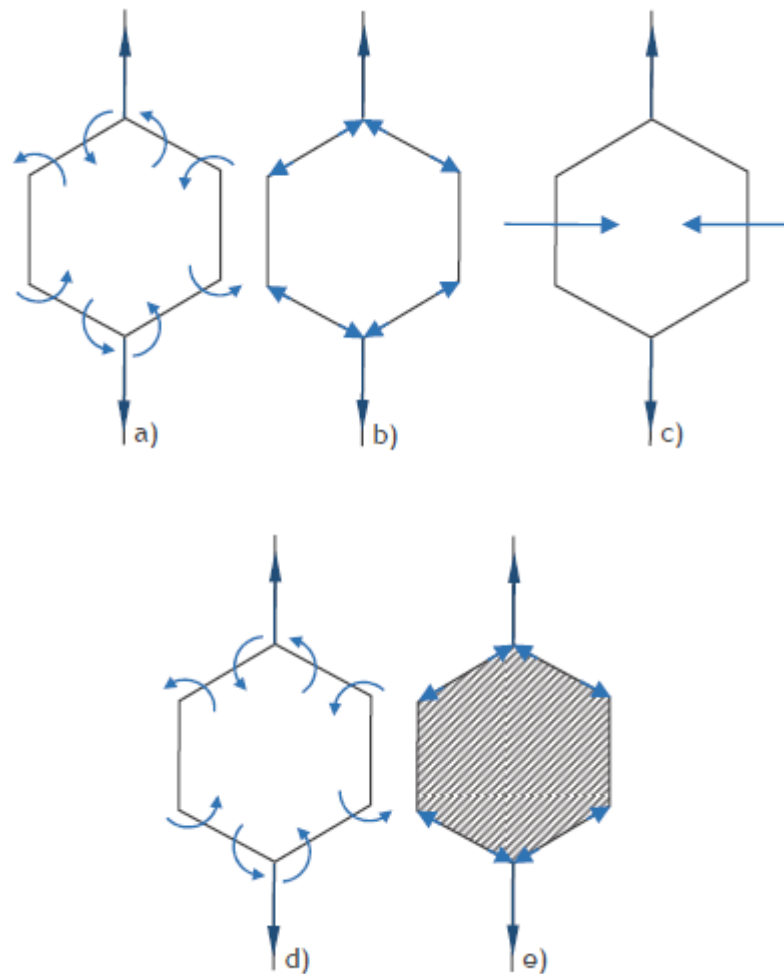


Figura 3.21 - Mecanismo de deformação à tração, células abertas a), b) e c), célula fechada d) e e) [15, 18-19].

Tal como se evidencia a figura 3.21, tanto a tração como a compressão, as espumas expõem uma zona que se pode considerar linearmente elástica, na medida em que as tensões progridem linearmente com as deformações. As tensões limites nas duas solicitações apresentadas costumam ser normalmente idênticas, sendo bastante usual uma tensão limite à tração ser superior à compressão.

De forma a relacionar propriedades elásticas com os critérios do material, como densidade relativa, geometria das células, entre outros aspetos, e para se obterem expressões matemáticas, existem diversos autores que defenderam distintas abordagens para esta problemática. A abordagem mais simplificativa foi a de Ashby. O mecanismo de Ashby e Gibson pode considerar-se redutora, pois despreza alguns parâmetros da

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

espuma, contudo é possível e mais fácil a permissão da compressão dos mecanismos de deformação envolvidos.

Em relação às células abertas, figura 3.22, as relações de Ashby e Gibson obtiveram-se modelando a espuma como um conjunto de células cúbicas, cada uma delas constituída por doze “vigas” de secção  $t$  e comprimento  $l$ . As células contíguas estão posicionadas, de maneira a que as “vigas” se encontrem a meio vão. O comportamento da espuma obtém-se através das leis básicas da mecânica clássica para vigas.

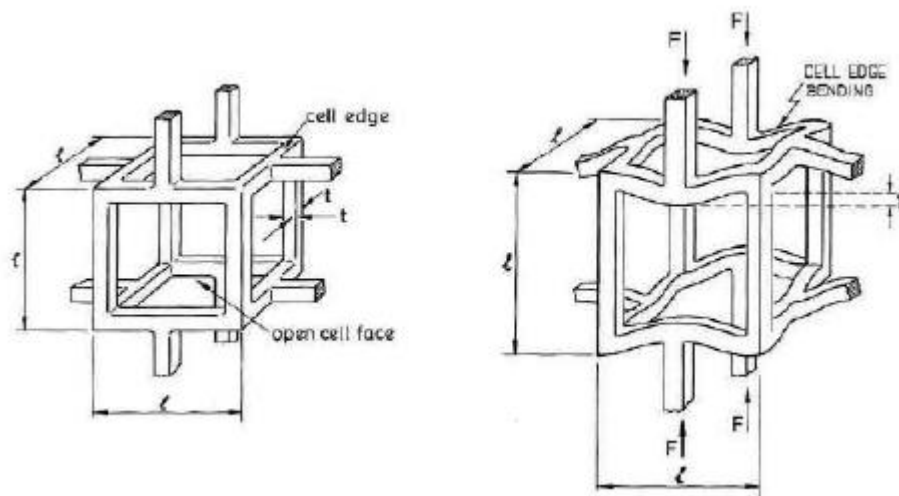


Figura 3.22 - Modelação para as células abertas Ashby e Gibson [16] – compressão.

Quanto às geometrias das espumas, estas apresentam-se bastante complexas em relação à que já foi referida. Todavia, a forma como o material se comporta limita-se pelos mesmos princípios. A relação com a geometria é definida segundo uma constante.

No que toca às células fechadas, ver figura 3.23, a interpretação mostra-se mais complexa. Quando estas se obtêm a partir do estado líquido, a tensão superficial nas faces das células pode fazer surgir uma concentração do material nas uniões celulares, que resultam em células fechadas, mas estas com paredes bastante finas. Assim, o comportamento demonstra-se particularmente equivalente às espumas de células abertas, uma vez que a contribuição da rigidez das paredes celulares é baixa. Contudo, este caso não se verifica sempre, podendo haver situações em que as paredes das células têm espessura considerável e, por isso, os modelos para calcular os parâmetros da espuma são distintos, de modo ligeiro, dos demonstrados anteriormente para a situação das espumas com células abertas.

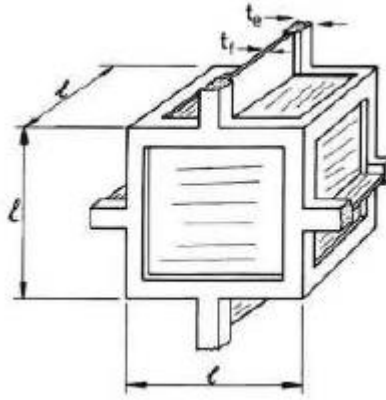


Figura 3.23 - Modelação para as células fechadas Ashby e Gibson [16] - compressão.

### 3.2.3 Anisotropia das Espumas Metálicas

A anisotropia é apresentada geralmente, em muitas das estruturas celulares. Nas estruturas de origem natural, esta é fundada na melhoria das propriedades numa determinada direção preferencial. Quanto às espumas, a anisotropia não é o resultado mais esperado do processo de fabrico utilizado. No caso das espumas, por exemplo, obtidas com insuflação de ar ou então, com a utilização de um agente que liberta gás, as células originadas tendem a ter uma forma alongada numa certa direção, o que demonstra alguma anisotropia.

Nos materiais celulares, a anisotropia é a consequência de dois motivos, a anisotropia da estrutura celular e a anisotropia do material das paredes celulares. Quando estão em causa espumas metálicas, a anisotropia do material já é desprezável, apenas resultando os efeitos da estrutura [19].

### 3.2.4 Propriedades de Absorção de Energia da Espuma

Uma característica importante das espumas metálicas é a capacidade de absorção de energia quando deformadas. Esta capacidade é quantificada pela eficiência, a qual compara a energia absorvida durante a deformação pelo material real com um absorvedor de energia ideal. Um absorvedor ideal representa-se pela curva de compressão retangular visível na figura 3.24, isto é, é apresentada uma deformação máxima admissível e mantém-se constante durante todo o processo de deformação. A eficiência  $\eta_{ef}$  é definida

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

como a razão entre a energia absorvida durante a deformação de compressão  $s$  e a energia absorvida pelo absorvedor ideal:

$$\eta_{ef} = \frac{\int_0^s F(s') ds'}{F_{\max}(s)s} \quad (3.57)$$

Onde  $F_{\max}(s)$  é a força mais elevada que ocorre a cima da deformação  $s$ .

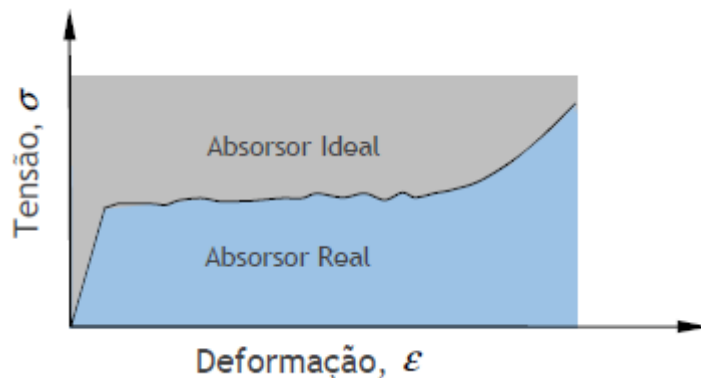


Figura 3.24 - Representação esquemática de um Absorvedor real versus Absorvedor ideal [19].

Como a maior parte dos materiais, as espumas metálicas também apresentam uma variação de tensão à compressão, o que significa também, a variabilidade da eficiência durante a deformação. A qualidade dos sistemas de absorção de energia é demonstrada segundo a capacidade de retenção de energia sem que se atinja a região de densificação, a partir do qual o material tende a demonstrar um comportamento idêntico ao comportamento de um material sólido homogêneo.

A energia absorvida por unidade de volume de material corresponde à área abaixo da curva de tensão deformação e a quantidade de energia absorvida varia conforme a densidade da espuma, morfologia celular, material de base da espuma bem como todos os critérios que afetam o comprimento do patamar visível na curva de compressão destes materiais, figura 3.25. A absorção de energia, neste tipo de materiais, é fundamentada pela conversão irreversível em energia de deformação plástica, uma vez que esta explicação é a adequada para uma boa capacidade de absorção de energia pelas espumas [20, 29].



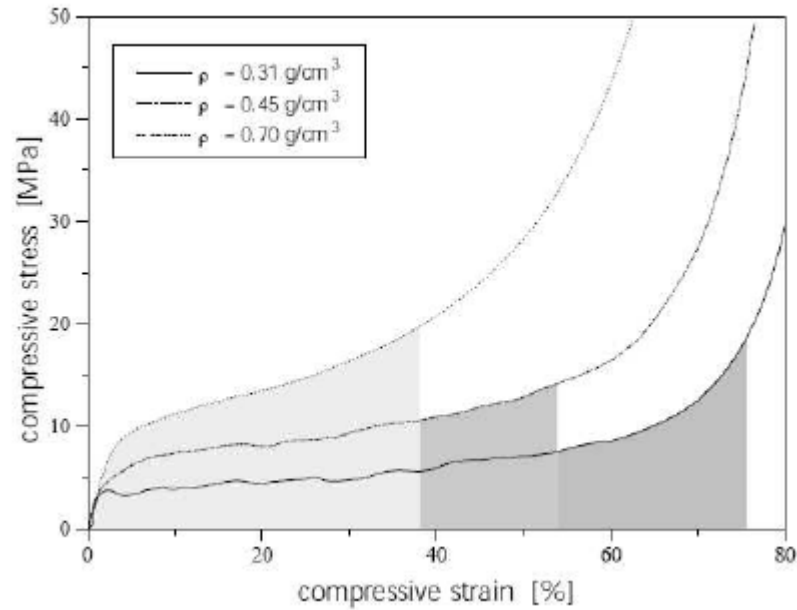


Figura 3.25 - Curvas de compressão de espumas de alumínio para diferentes densidades [21].

### 3.2.5 Modelo Elastoplástico do Núcleo

Para se descrever o comportamento elastoplástico do núcleo da estrutura sandwich de espuma metálica utilizou-se o modelo Deshpande, para este tipo de material. Este modelo foi escolhido pelos seguintes motivos:

- Primeiramente, porque este modelo é adequado para descrever o comportamento mecânico dos materiais porosos metálicos, os quais se distinguem dos materiais metálicos sólidos. Este modelo trata especialmente, de espumas metálicas. A superfície de cedência desenvolveu-se segundo a correlação de dados experimentais que são obtidos num ensaio multiaxial. Este consiste numa aplicação gradual e simultânea de pressão hidrostática e de uma carga uniaxial. Deste modo, alcança-se um conjunto de pontos no plano pressão,  $p$ , versus tensão equivalente,  $q$ , que correspondem ao início de cedência.
- Posteriormente, o facto de um dos parâmetros da superfície de cedência deste modelo, e consequentemente da lei de fluxo, ser o coeficiente de Poisson plástico, este modelo não prevê precisamente o comportamento de espumas se estas possuírem coeficientes de Poisson plásticos próximos de zero. Assim, é expectável que a utilização deste parâmetro como variável da superfície de

cedência e lei do fluxo admita ser adequado este modelo para ser aplicado a várias marcas de espumas com distintos coeficientes de Poisson [23, 24].

#### 3.2.6 Critério de Cedência

O modelo de Deshpande é um modelo elastoplástico, como tal e à semelhança do que acontecia para as faces baseia-se na lei da decomposição, assumindo o comportamento do material, quando é verificado uma extensão causada pela carga aplicada é elástico até um certo ponto, denominado limite elástico. Após este limite, o material apresenta-se deformado plasticamente. Este modelo baseia-se na teoria da elasticidade que se fundamenta na lei de Hooke, que é aplicável a sólidos isotrópicos e espumas metálicas isotrópicas, de modo a modelar o comportamento elástico do material para pequenas deformações. A deformação elástica é representada por:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.58)$$

Após o material alcançar o valor da tensão de cedência, quando a deformação plástica se inicia, significa que já se verificou a cedência do material. É neste momento que o material do núcleo poroso, tal como o material das faces (sólido homogêneo) se diversificam em termos de comportamento, uma vez que apresentam cedências diferentes por causa das estruturas físicas diversas. Esta distinção de comportamentos materiais acompanha-se pelos modelos e é neste momento que o comportamento da espuma é distinto em relação às faces.

Quanto às espumas metálicas, quando existe deformação plástica, surge uma variação de volume, contrariamente aos metais sólidos homogêneos. O que significa que, a nível do modelo constitutivo a pressão hidrostática tem influência na superfície de cedência do material. Deste modo, para os metais sólidos incompressíveis, o parâmetro de cedência pode ser dada por:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \quad (\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3) \quad (Tresca) \quad (3.59)$$

$$\sigma_e \leq \sigma_{Y0} \quad (Von Mises) \quad (3.60)$$

Em que:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.61)$$

Quando exista uma deformação plástica nas espumas metálicas, o parâmetro de cedência pode ser:

$$\hat{\sigma} \geq \sigma_{y0} \quad (3.62)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(1 + (\alpha/3)^2)} [\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2] \quad (3.63)$$

Em que:

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.64)$$

Em que,  $\hat{\sigma}$  é a tensão equivalente,  $\sigma_e$ , é a tensão de Von Mises,  $\sigma_m$  representa a pressão hidrostática e caracteriza-se como  $\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$ ,  $\alpha$  é um parâmetro que demonstra a forma da superfície de cedência e  $\sigma_{y0}$ , a tensão de cedência material.

### 3.2.7 Definição da Superfície de Cedência

A superfície de cedência, nos termos do modelo Deshpande, foi desenvolvida segundo a correlação de dados experimentais conseguidos num ensaio multiaxial. Este ensaio constitui a aplicação progressiva, assim como simultânea de pressão hidrostática e de uma carga uniaxial, ver figura 3.26.

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

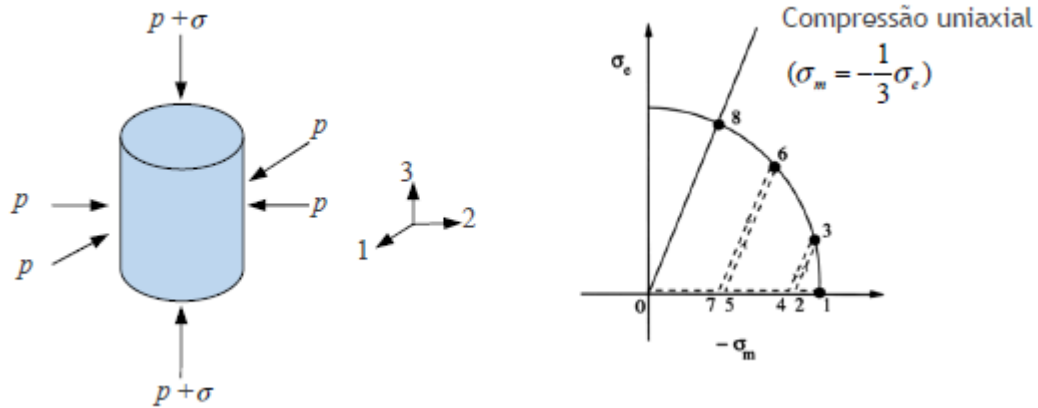


Figura 3.26 - Definição da superfície de cedência do modelo Deshpande [22].

Do conjunto de pontos obtidos pelo modelo Deshpande, o resultado para diferentes espumas e diferentes densidades é representado pela figura 3.27.

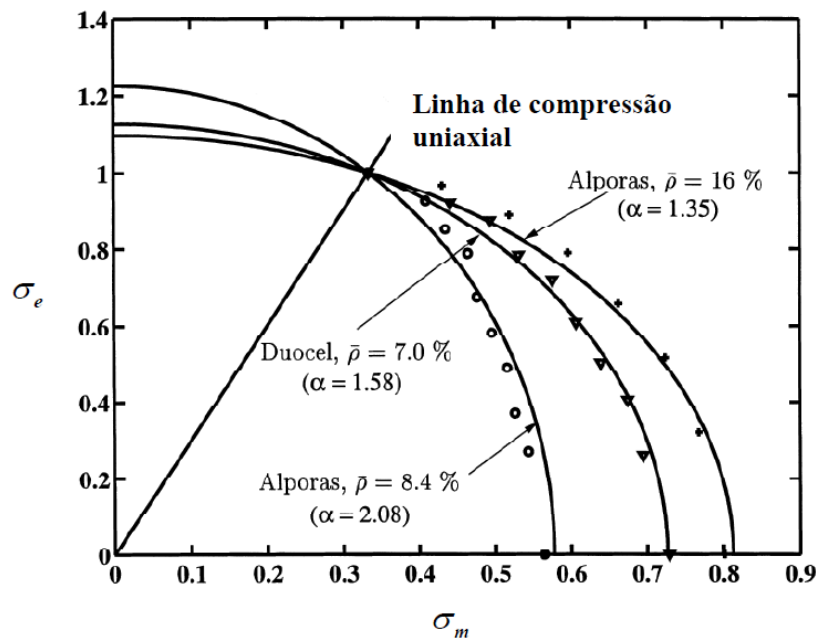


Figura 3.27 - Resultados da definição da superfície de cedência do modelo de Deshpande [22].

#### 3.2.8 Modelo de Deshpande

Perante os resultados experimentais da definição experimental da superfície de cedência, pode ser definida, figura 3.28, no seguinte referencial p, q:

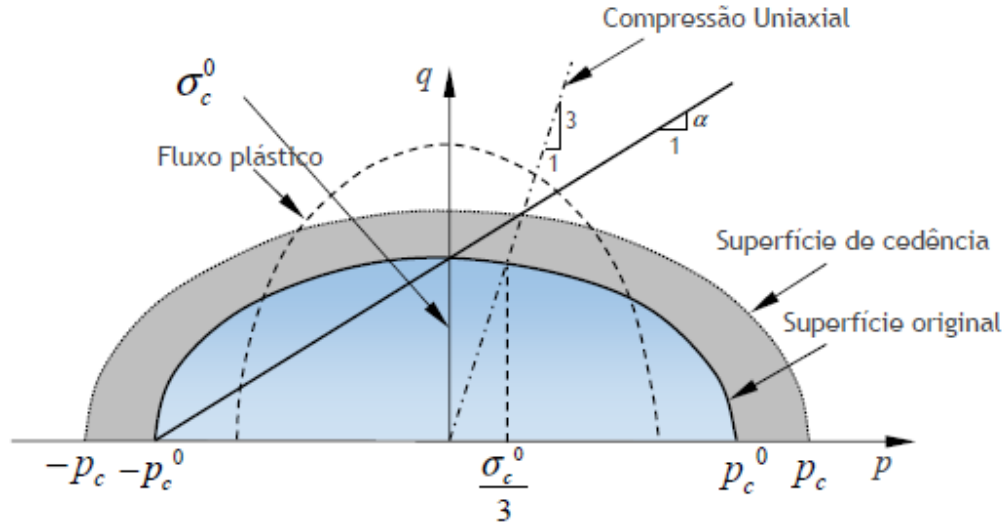


Figura 3.28 - Superfície de cedência do modelo de Deshpande em referencial  $p, q$  [22].

$$\phi \equiv \bar{\sigma} - \sigma_{Y0} \leq 0 \quad (3.65)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{q^2 + \alpha^2 p^2}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}} - \sigma_{Y0} = 0 \quad (3.66)$$

O fluxo plástico admite-se normal à superfície de cedência, resultando assim:

$$\dot{\varepsilon}^P = \dot{\gamma} N \quad (3.67)$$

O coeficiente de Poisson plástico, com fundamento na expressão do fluxo plástico associativo, pode ser definido como:

$$v_p = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} \quad (3.68)$$

A definição da superfície de cedência em função do coeficiente de Poisson plástico, resolvida a equação anterior em ordem a  $\alpha$ , pode ser dada:

$$\alpha^2 = \frac{9(1 - 2\nu_p)}{2(1 + \nu_p)} \quad (3.69)$$

Em regime plástico, relativamente ao estudo dos comportamentos dos materiais, há duas enunciações que fundamentam as relações constitutivas, sendo elas: a teoria incremental que ampara a influência da trajetória de carregamento e assim, estabelece a relação entre as tensões aos incrementos de deformação plástica; e a teoria da deformação determina a relação entre o tensor das tensões e o tensor das extensões.

Na teoria incremental, esta serve de base à teoria do escoamento plástico, e a teoria da deformação total, ou seja, a segunda teoria, fundamenta-se na teoria da deformação plástica. Geralmente, o estado de deformação plástico é subordinado à trajetória do carregamento, coincidindo ambas as teorias para o caso em que o carregamento demonstra uma trajetória linear. Contudo, na teoria da deformação plástica, apesar do desconhecimento da influência da trajetória do carregamento, esta é bastante utilizada, dado que a sua aplicação é acessível e simplifica assim, os problemas resultantes de plasticidade [3].

Com fundamento na teoria incremental, um incremento de carga leva a um aumento de tensão, o que faz originar um incremento de deformação, o qual pode ser dividido numa componente elástica e noutra plástica. Assim, é executável rescrever o tensor das deformações elásticas.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \quad (3.70)$$

$$\dot{\varepsilon}^e = \dot{\varepsilon} - \dot{\gamma}N \quad (3.71)$$

A lei do escoamento plástico ou também designado de fluxo associativo pode ser resultado de um aumento de deformação plástica que derive de uma função potencial. Por esta função potencial plástico  $Q(\sigma)$ , compreende-se a função escalar do tensor das tensões a partir do qual os incrementos de deformação plástica podem ser determinados por derivação parcial em ordem às componentes do tensor das tensões, onde a função de cedência coincide com o potencial plástico,  $Q \equiv F$ , isto é, o gradiente  $\partial F / \partial \sigma$  ou  $\partial \phi / \partial \sigma$  chamado de vetor fluxo, é normal à superfície de cedência, como demonstra a figura 3.29 [5, 25-27].

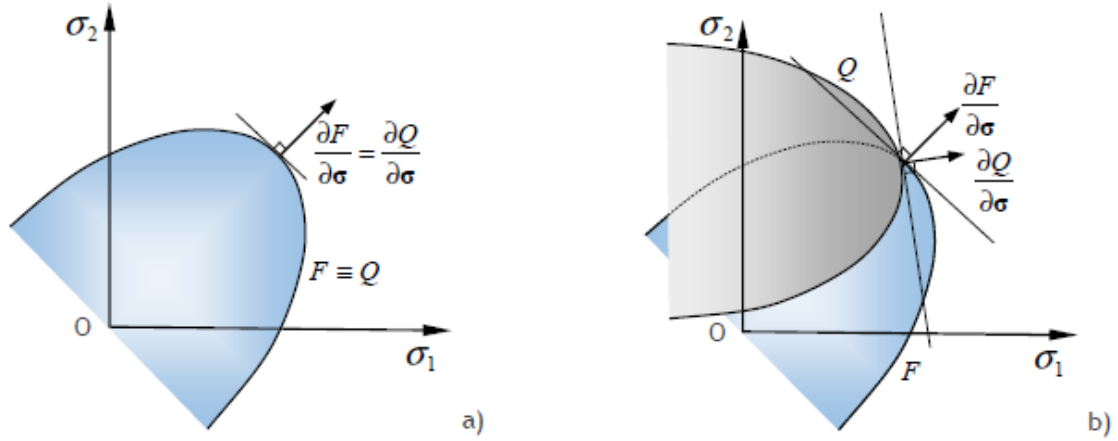


Figura 3.29 - Formas de escoamento: a) associado; b) não associado [3].

Se considerarmos um referencial  $p, q$ ,  $N = \frac{\partial Q}{\partial \sigma} = \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}$ :

$$N = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = \frac{\partial \phi \partial q}{\partial q \partial \sigma} + \frac{\partial \phi \partial p}{\partial p \partial \sigma} \quad (3.72)$$

$$N = \frac{3q}{\sqrt{(q^2 + \alpha^2 p^2)(\alpha^2 + 9)}} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + \frac{3p\alpha^2}{\sqrt{(q^2 + \alpha^2 p^2)(\alpha^2 + 9)}} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (3.73)$$

Sendo  $q = \sqrt{\frac{3}{2} S:S}$  a tensão de Von Mises, a sua derivada é uma derivada tensorial, assim representada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma} &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sqrt{\frac{3}{2} S:S} \right) = \frac{3}{2} \frac{S}{\sqrt{\frac{3}{2} S:S}} : \frac{\partial S}{\partial \sigma} = \frac{3S}{2q} : \frac{d}{d\sigma} \left( \sigma - \frac{p}{3} I \right) \\ &= \frac{3}{2} \frac{S}{q} : \left( II - \frac{1}{3} I \otimes I \right) \Leftrightarrow \frac{\partial q}{\partial \sigma} = \frac{3}{2} \frac{S}{q} \end{aligned} \quad (3.74)$$

Sendo  $p = \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma)$  a pressão hidrostática a sua derivada é uma derivada tensorial, em que:

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{1}{3} I : \sigma \right) = \frac{1}{3} I \quad (3.75)$$

Assim, a deformação plástica é dada por:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^P = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^P : \dot{\epsilon}^P} \quad (3.76)$$

De cuja substituição na equação (5.41) resulta:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^P = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\gamma}^2 N : N} = \dot{\gamma} \sqrt{\frac{2}{3} N : N} \quad (3.77)$$

O modelo de Deshpande pode resumir-se por:

Lei estática:

$$\sigma = D^e : \epsilon^e \quad (3.78)$$

Superfície de cedência:

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} [q^2 + \alpha^2 p^2]} - \sigma_y(\bar{\epsilon}^p) = 0 \quad (3.79)$$

Lei de evolução plástica:

$$\dot{\epsilon}^P = \dot{\gamma} N \quad 3.80$$

Lei de evolução elástica:

$$\dot{\epsilon}^e = \dot{\epsilon} - \dot{\gamma} N \quad 3.81$$



### 3.3 Propriedades para simulações numéricas

Com base no comportamento das faces e do núcleo acima referido é necessário determinar as propriedades dos materiais utilizados em estruturas sandwich. Deste modo, e para que o “ABAQUS” consiga aproximar o máximo possível o comportamento das estruturas sandwich, nas simulações numéricas, com a situação real, é necessário introduzir propriedades determinantes dos materiais, para determinar o comportamento da estrutura sandwich.

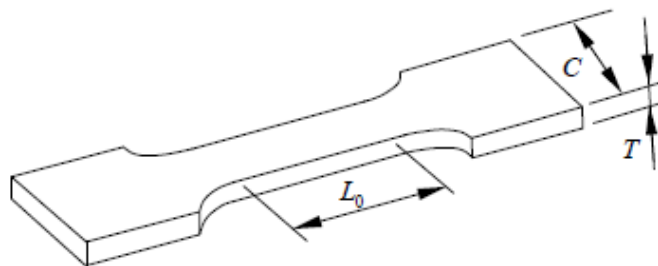
#### 3.3.1 Propriedades das chapas de alumínio

Inicialmente, a deformação de uma material passa pela fase elástica, as características elásticas do alumínio são fornecidas pelo fabricante, ver tabela 3.1.

*Tabela 3.1 - Propriedades elásticas da chapa de alumínio EN 5754 [1].*

<b><math>E_c</math> [GPa]</b>	<b><math>\nu_c</math></b>	<b><math>\sigma_Y</math> [MPa]</b>
<b>70</b>	0,3	118

No que diz respeito a parte plástica, esta é caracterizada pelos pontos tensão – deformação, que são obtidos experimentalmente num ensaio de tração. A estes pontos tensão – deformação dá-se o nome de tensão convencional ( $s$ ) e deformação convencional ( $e$ ) e podem ser definidos da seguinte maneira, figura 3.30:



*Figura 3.30 - Modelação numérica ensaio de tração – chapa [1].*

Sendo:

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo

- $L_0$  – Comprimento de referência inicial
- $S_0 = C \times T$  – Secção inicial
- $s = F / S_0$  – Tensão convencional (Engineering stress)
- $e = 100 \times (L - L_0) / L_0$  – Deformação convencional (%) (Engineering Strain)

Se a deformação for escrita em escala logarítmica passamos a ter aquilo a que se chama tensão ( $\sigma$ ) e deformação real ( $\varepsilon$ ), usada mais corretamente para definir estes conceitos, deste modo:

$\sigma = F / S$  – Tensão real (true stress)

$\varepsilon = \ln(L / L_0)$  – Deformação real (true strain)

Obtidos os pontos tensão - deformação convencional pelo ensaio de tração é necessário converte-los em pontos tensão – deformação real. Essa transformação é efetuada através das expressões (3.82) e (3.83).

$$\sigma = s \left( 1 + \frac{e}{100} \right) \quad (3.82)$$

$$\varepsilon = \ln \left( 1 + \frac{e}{100} \right) \quad (3.83)$$

Posto isto, é possível obter para caracterizar a parte plástica uma curva semelhante à figura 3.31. Nesta figura está representado apenas o domínio plástico uma vez que no domínio elástico existe um comportamento linear entre a tensão e a deformação.

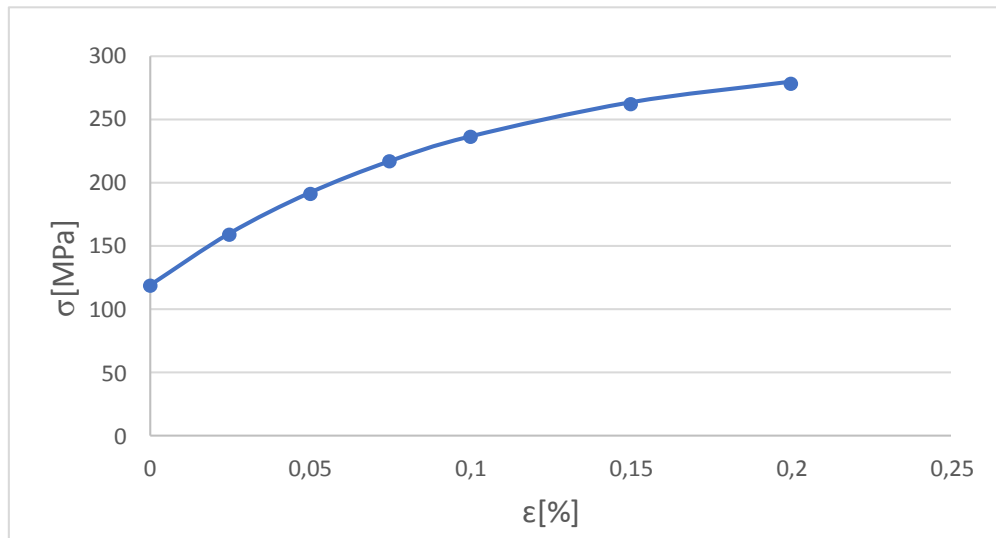


Figura 3.31 - Pontos tensão real - de formação real.

Pela análise da figura 3.31 é visível que o conjunto de pontos tensão – deformação obtidos apenas caracterizam o material para deformações baixas, devido ao fenómeno de fratura, não caracterizando o material para deformações mais elevadas. Para resolver este tipo de problema é normalmente utilizado a lei de Voce, que consiste em extrapolar para obter pontos para obter pontos de tensão - deformação para valores de deformação mais elevados. Contudo para o estudo desta dissertação os valores disponibilizados pelo ensaio de tração são suficientes para descrever o comportamento do material. Para os ensaios dinâmicos é necessário também a densidade do alumínio que é cerca de  $2700 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.3.2 Propriedades da espuma de alumínio

As propriedades das espumas metálicas são obtidas de diversas maneiras, diretamente do ensaio de compressão ou através de relações definidas pelo modelo usado e ainda também através do catálogo do fabricante. Assim sendo, na definição da parte elástica o Modulo de Young (E) foi obtido através da curva tensão – deformação obtida no ensaio (figura 3.32), sendo igual  $E=0,79 \text{ GPa}$  e o coeficiente de Poisson igual a  $\nu=0,33$  fornecido no catálogo do fabricante.

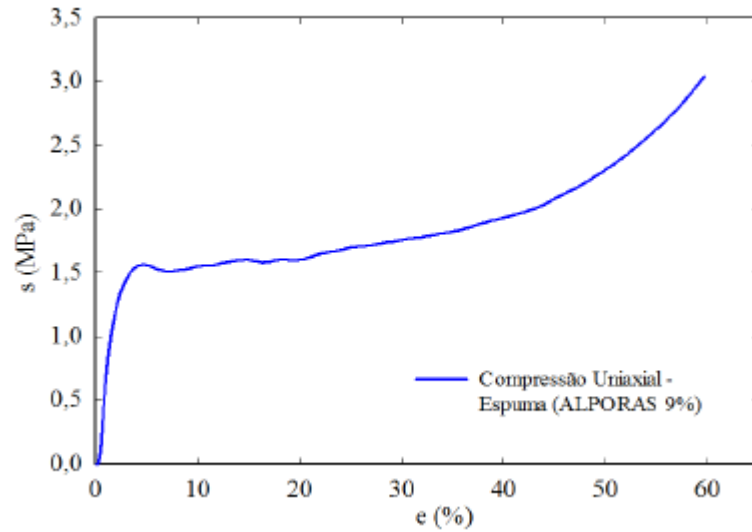


Figura 3.32 - Curva tensão - deformação usada na modelação numérica – Espuma [1].

As restantes constantes ( $k$ ,  $v_p$ ) são obtidas através das seguintes expressões obtidas na definição do modelo.

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9 - k^2}} \quad (3.84)$$

$$k = \sqrt{3(1 - 2v_p)} \quad (3.85)$$

Por outro lado, o modelo de Deshpande estabelece para uma espuma deste tipo (célula fechada), e com uma densidade relativa de 8.4% o parâmetro que define a superfície de cedência como sendo  $\alpha=2.08$ . Devido a impossibilidade de realizar um ensaio multiaxial que define este parâmetro para a espuma de 9,2% de densidade relativa (densidade da espuma de 250 kg/m<sup>3</sup>) usada nesta tese, e para o parâmetro  $\alpha$  ser o mais exato possível, será feita uma extrapolação a partir da espuma de 8.4%. Assim sendo, o valor aproximado de  $\alpha$  é 2.11, com este valor é possível obter o módulo de compressibilidade,  $k$ , e o coeficiente Poisson plástico  $v_p$ :

$$2,11 = \frac{3k}{9 - k^2} \Leftrightarrow k = 1,73 \quad (3.86)$$

$$k = \sqrt{3(1 - 2\nu_p)} \Leftrightarrow 1,73 = \sqrt{3(1 - 2\nu_p)} \Leftrightarrow \nu_p = 0,004 \quad (3.87)$$

Os pontos de tensão - deformação foram ainda usados para descrever a evolução plástica do material (figura3.32).

O resumo em termos de parâmetros é apresentado na tabela 3.

*Tabela 3.2 - Propriedades da espuma metálica [1].*

	<b>E[GPa]</b>	<b>ν</b>	<b>k</b>	<b>ν<sub>p</sub></b>
<b>Elástico</b>	0,79	0,33	-	-
<b>Plástico</b>	-	-	1,73	0,004

## Referências

- [1] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformação Constituídas por Núcleo de espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP,2014, Porto
- [2] Fundamentos e aplicacoes do aluminio, Associacao Brasileira do Aluminio - ABAL, Maio/2007.
- [3] Natal Jorge R. M; Dinis L. M. J. S., Teoria de plasticidade; Departamento de Engenharia Mecânica; FEUP, Porto, 2005.
- [4] Von Mises, R., Mechanic der Festen Korper in Plastisch Deformablem Zustand, Gottinger Nachr. Math. Phys. Kl., pp.582, 1913.
- [5] Hill, R., The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, 1950.
- [6] Odquist, F.K.G., Math. Mech., Vol.13, pp.360, 1933.
- [7] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, 2nd ed., McGraw-Hill, Tokyo, 1976.
- [8] Johnson, W. & Mellor P.B., Plasticity for Mechanical Engineers, Van Nostrand Reinhold Company, London, 1962.
- [9] Thomas, T.J., Nair, S. & Garg, V.K., A numerical study of plasticity models and finite elements types, Comp. & Struct., Vol.16, pp.669-675, 1983.

- [10] Ekmark, B., On Large Strain Theories in Sheet Metal Forming, PhD. Thesis, Lulea University, Sweden, 1983.
- [11] Schonauer, M., Unified numerical analysis of cold and hot metal forming processes, PhD. Thesis, University College of Swansea, Wales, U.K, 1993.
- [12] Duarte, J., Conformacao plastica de chapas metalicas: simulacao numerica e caracterizacao mecanica, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 1997
- [13] Hill R., A Mathematical theory of plasticity, Clarendon Press, Oxford, 1950.
- [14] Abaqus, Inc. Abaqus Analysis User's Manual Version 6.10.
- [15] Ashby, MF et al., Metal foams: a design guide, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [16] Ashby, MF et al., Cellular solids - Structure and Properties, Pergmon Press, 1997.
- [17] Tekoğlu, C., Size effects in cellular solids, Rijksuniversiteit Groningen, 2007.
- [18] M. Yu, Banhart, J. Mechanical properties of metal foams Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, Verlag MIT, Bremen, 1998.
- [19] Duarte, I., Espumas metalicas Processo de fabrico, caracterizacao e simulacao numerica, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 2005.
- [20] Neves M. P. Rui, Modelacao Constitutiva do Comportamento Mecanico de Espumas Metalicas, Tese de Mestrado, FEUP, Porto, 2009.
- [21] Owen, D.R.J. & Hinton, E., Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice, Pineridge Press, Swansea, U.K, 1980.
- [22] Deshpande, V. S., and N. A. Fleck, Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams; Journal of the Mechanics and Physics of Solids, pp. 1253-1276, 2000.
- [23] Mata H. et al, Study of sandwich shells with metallic foam cores Int J Mater Form Vol. 3 Suppl 1:903- 906 DOI 10.1007/s12289-010-0914-x, Springer-Verlag France; 2010.
- [24] Neves M. P. Rui, Modelacao Constitutiva do Comportamento Mecanico de Espumas Metalicas, Tese de Mestrado, FEUP, Porto, 2009.
- [25] Kachanov, L.M., Fundamentals of the Theory of Plasticity, MIR Publishers, Moscow, 1974.
- [26] Chakrabarty, J., Theory of Plasticity, McGraw-Hill, Singapore, 1987.
- [27] Neto ES, et al, Computational Methods for Plasticity, John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [28] Barlat F, Lege DJ, Brem JC, A six-component yield function for anisotropic metals, Int J Plast 7:693-712, 1991

- [29] Barlat F, Maeda Y, Chung K, Yanagawa M, Brem JC, Hayashida Y, Lege DJ, Matsui K, Murtha SJ, Hattori S, Becker RC, Makosey S, J Mech Phys Solids 45:1727-1763, 1997.
- [30] Banhart, J.; Ashby, M.F.; Fleck, N.A., Metal Foams and Porous Metal Structures. Proceedings of the International Conference (MetFoam'99), MIT-Verlag, Bremen, 1999.

### 3. Propriedades mecânicas da face e do núcleo



## **CAPÍTULO 4**

### **4 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS E DA MALHA**

Todos os ensaios realizados, ao longo desta dissertação, serão apenas executados numericamente, utilizando o programa “ABAQUS”. Assim, o objetivo neste capítulo é perceber e clarificar a influência dos elementos e da malha na veracidade dos resultados obtidos, no sentido de tentar obter resultados o mais próximo possível da realidade e com o menor esforço computacional possível. Posteriormente, será determinado o peso de duas placas diferentes, uma de estrutura sandwich e outra em alumínio, com igual rigidez. Este procedimento tem como objetivo perceber qual das placas tem um maior rácio de rigidez versus peso.

#### **4.1 Análise dos elementos e da malha**

Para a análise dos elementos será efetuado um exercício comum a todos os ensaios, que tem como objetivo conjugar os diferentes elementos com diferentes malhas. Por fim, será comparado os resultados de elementos diferentes para a mesma malha, bem como os resultados dos mesmos elementos para malhas diferentes.

O exercício, utilizado para a análise, consiste numa placa encastrada solicitada com uma carga dinâmica de  $500\sin(100t) \text{ N}$ , na extremidade oposta ao encastramento, ver figura 4.1. A placa tem dimensões  $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  e espessura de  $10 \text{ mm}$ , sendo que a espessura divide-se em  $1 \text{ mm}$  de alumínio em cada extremidade e  $8 \text{ mm}$  de núcleo em espuma de alumínio.

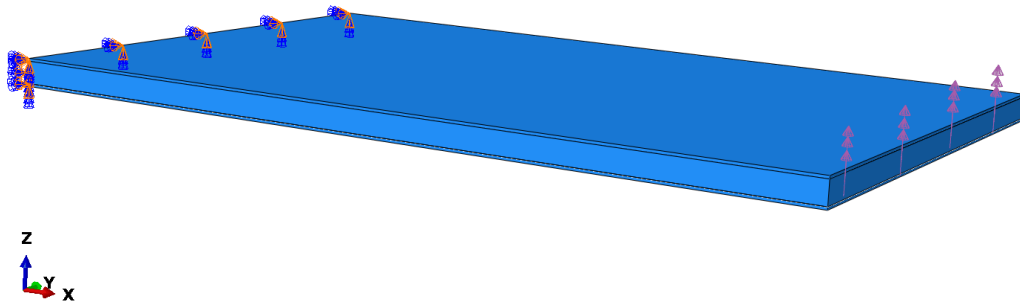


Figura 4.1 - Exercício prático

Neste capítulo, como se versa sobre o estudo da malha e dos elementos, será desprezado o adesivo utilizado para unir as faces ao núcleo, uma vez que este não tem relevância para o estudo em questão. Deste modo, é utilizada a função TIE do “ABAQUS”, que cola os elementos comuns às faces e ao núcleo.

Tendo sido utilizado o programa “ABAQUS” para a realização das simulações dinâmicas, teremos de escolher a função “dynamic implicit”, sendo esta apropriada para problemas gerais com cargas dinâmicas.

As propriedades elásticas e plásticas do alumínio e da espuma são as definidas no capítulo 3. Relativamente às leis constitutivas e parâmetros relativos à modelação numérica do ensaio utilizaram-se modelos de isotropia para o caso da espuma e das faces. Embora, a isotropia não seja uma característica destas estruturas e materiais, a utilização deste pressuposto é uma boa aproximação para o caso de estudo em questão.

### 4.1.1 Elementos

Os elementos disponibilizados pelo “ABAQUS”, mais comuns, neste tipo de problemas são: os elementos 3D hexaédricos de 8 nós. No entanto, estes podem dividir-se em três, sendo eles C3D8, C3D8R e C3D8I.

Os elementos C3D8 são o caso mais geral dos elementos hexaédricos 3D de 8 nós, estes utilizam funções de forma lineares e a sua universalidade permite a utilização para

diversos tipos de geometria, material e condições fronteira. Por isso, é exigido um maior esforço computacional por parte destes elementos [2].

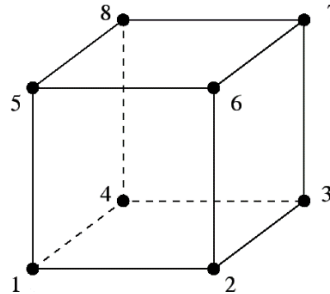


Figura 4.2 - Elemento C3D8 [2].

No que diz respeito aos elementos C3D8R, estes são a integração reduzida dos elementos C3D8. Estes elementos utilizam apenas um ponto de integração, localizado a meio do elemento. Apesar da redução dos pontos de integração aumentar a incerteza dos resultados obtidos, é necessário o balanço entre a necessidade computacional e a precisão dos resultados. É imprescindível ter um cuidado especial com este tipo de elementos, uma vez que em certas aplicações pode ocorrer instabilidade devido à flexão excessiva dos elementos, designando-se este fenómeno de “hourglass” [3,4].

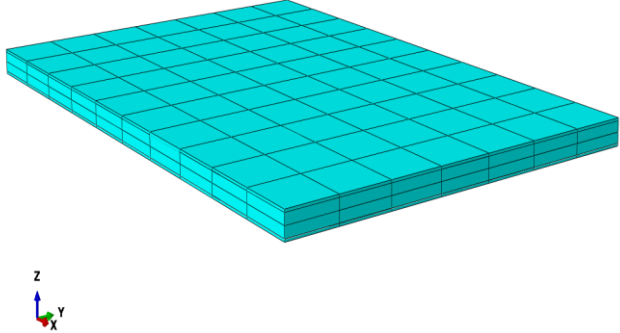
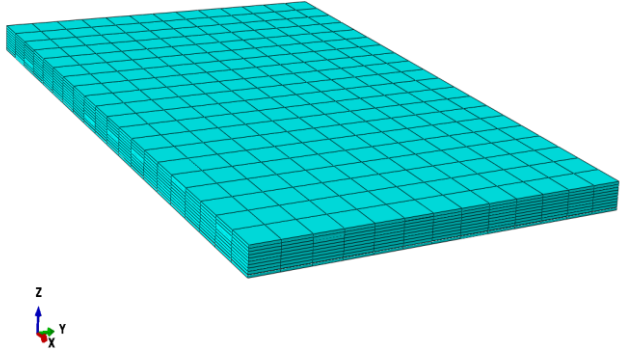
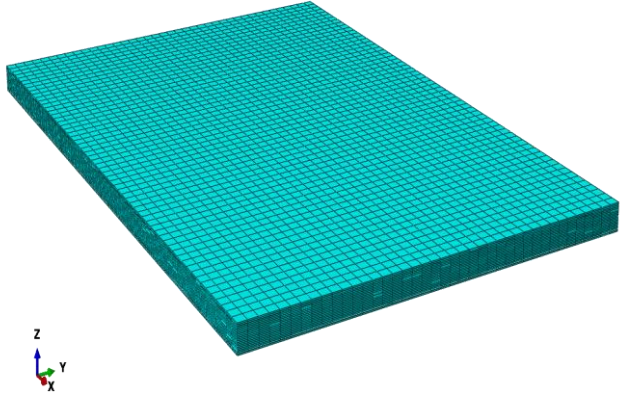
Por fim, os elementos C3D8I são os modos incompatíveis dos primeiros, o que quer dizer que é removida a retenção de corte (shear locking) e a retenção volumétrica é bastante reduzida, isto é, as funções de forma padrão são complementadas com as funções de bolha que tem valor zero em todos os nós e valores diferentes de zero entre eles [5].

#### 4.1.2 Tipo de malha

Para se analisar a influência da malha nos elementos utilizados, são necessariamente usadas três malhas distintas: uma mais esparsa (malha 1), uma intermédia (malha 2) e por fim, uma malha mais refinada (malha 3). Na tabela 4.1, podemos ver o número de elementos que cada malha utiliza para as faces e para o núcleo, assim como uma imagem de cada malha quando aplicada à estrutura sandwich em estudo.

#### 4. Influência dos elementos

Tabela 4.1 - Caracterização das malhas utilizadas.

	Número de elementos na chapa	Número de elementos na espuma	Ilustração da malha
<b>Malha 1</b>	70	140	
<b>Malha 2</b>	260	2080	
<b>Malha 3</b>	4800	38400	

#### 4.1.3 Resultados

Depois de definir as malhas e os tipos de elementos a utilizar, são efetuadas as simulações numéricas. Para comparar os resultados obtidos será retirado o deslocamento da face solicitada ao longo do tempo. Por questões de tempo de processamento, iremos calcular o deslocamento da placa durante cerca 0,2 segundos cerca de  $3T$  (vezes o período da carga).

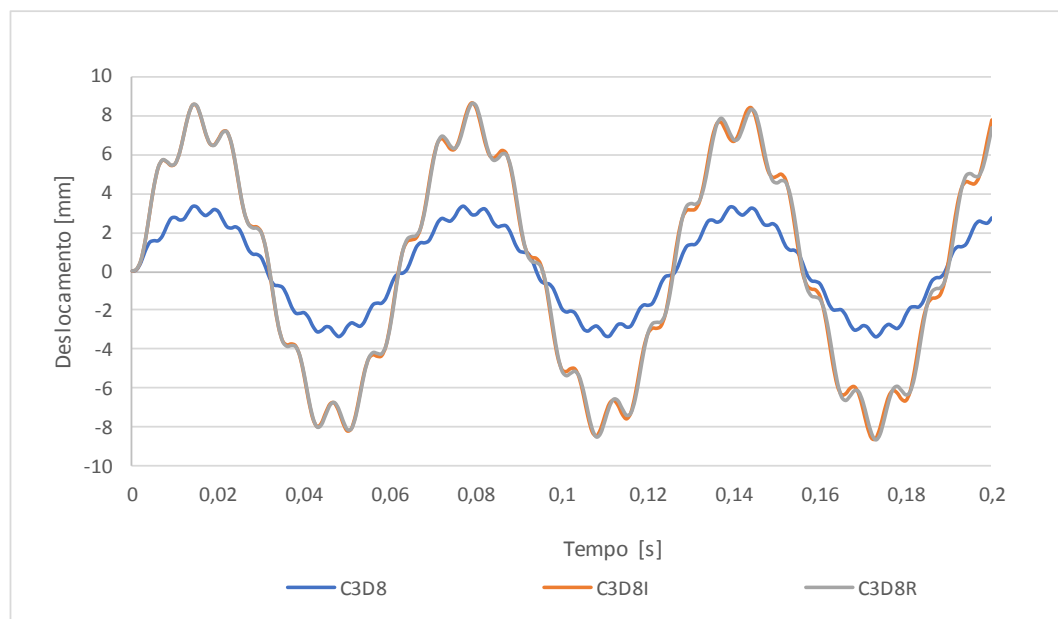


Figura 4.3 - Resultados para a malha 1

Como podemos verificar na figura 4.3, os elementos C3D8 apresentam uma diferença considerável relativamente aos elementos C3D8R e C3D8I que têm os deslocamentos bastante próximos. De referir que, neste caso, a integração reduzida e os modos incompatíveis apresentam uma grande proximidade, o que quer dizer que podem estar mais próximos dos valores reais. De notar também, que usando uma malha grosseira os resultados podem divergir, induzindo o utilizador em erro. Este é o grande problema desta ferramenta, pois se o utilizador não interpretar corretamente os parâmetros pode obter resultados bastante enganadores.

#### 4. Influência dos elementos

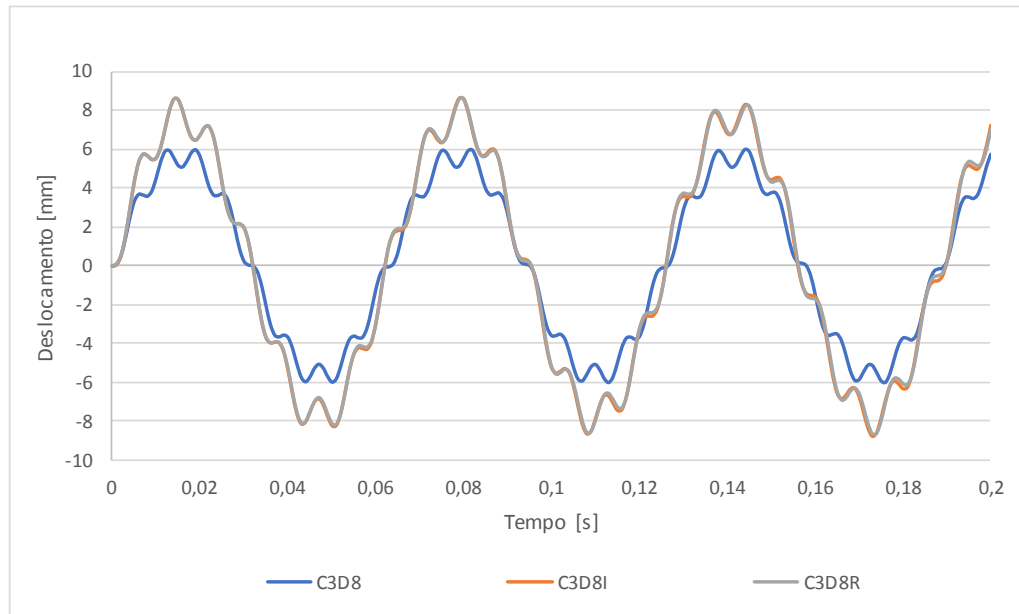


Figura 4.4 - Resultados malha 2

Na malha 2, como podemos verificar, existe uma ligeira aproximação dos resultados obtidos pelos elementos C3D8 em comparação com os outros dois elementos que se mantêm idênticos. No entanto, numa análise mais detalhada observa-se que os dois resultados tendem a divergir com o decorrer do tempo, sendo que essa diferença é quase insignificante para pequenos intervalos de tempo, como é caso.

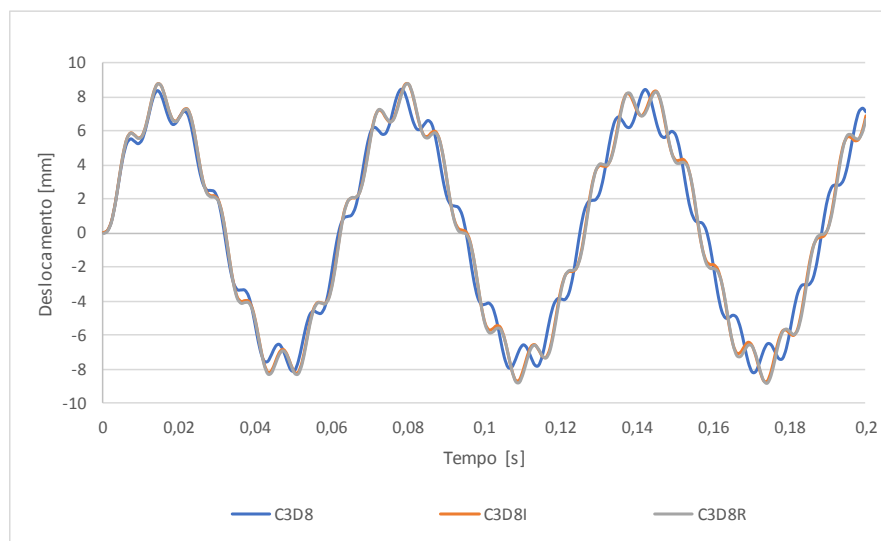


Figura 4.5 - Resultados para a malha 3

Finalmente, na figura 4.5 são apurados os resultados para a malha 3, sendo que neste caso existe uma aproximação do elemento C3D8 aos restantes, tal como já tínhamos verificado anteriormente. Contudo, mais uma vez, as três soluções tendem a afastar-se ao longo do tempo. Podemos agora afirmar também, que os elementos C3D8R e C3D8I apresentam desde a malha 1 resultados bastante fiáveis não sofrendo grande alteração, contrariamente com o que acontece com os elementos C3D8, em que existe uma alteração significativa com a alteração das malhas (ver figura 4.6), no sentido de se aproximarem dos deslocamentos reais.

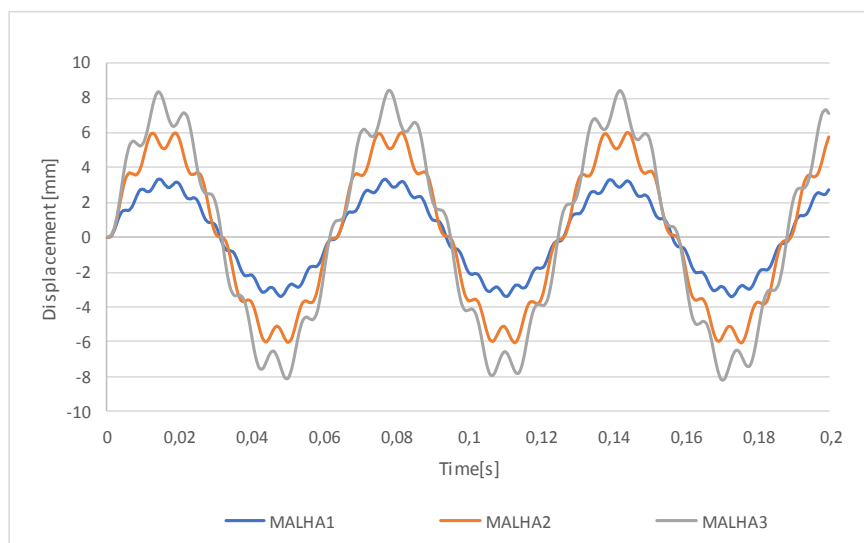


Figura 4.6 - Evolução dos resultados para os elementos C3D8.

Em conclusão, para este caso concreto, os elementos C3D8R e C3D8I permitem obter resultados mais assertivos mesmo que a malha seja mais grosseira. Pelo contrário, os elementos C3D8 são muito influenciados pela malha dando resultados bastante díspares da realidade se a malha não for devidamente refinada.

### 4.2 Diferença do rácio de rigidez/peso entre a estrutura sandwich e o alumínio

Uma questão muito pertinente relativamente a este tipo de painéis sandwich é a diferença entre rácio de rigidez/peso quando se compara uma chapa sandwich com uma de alumínio com a mesma rigidez.

Através do método dos deslocamentos determinamos que:

$$F = k \times u \quad (4.1)$$

Em que, o vetor  $F$  significa as forças aplicadas ao sistema, a matriz  $k$  é a matriz de rigidez do sistema e o vetor  $u$ , o vetor de deslocamentos. Analisando a equação, verificamos que se aplicarmos a mesma força em materiais diferentes e obtivermos o mesmo vetor de deslocamento, estamos perante rigidez semelhante entre os materiais.

Assim, foi aplicada uma força sobre uma placa sandwich que provoca um determinado deslocamento, e posteriormente, foi aplicada a mesma força a uma chapa de alumínio, alterando a sua espessura, até obter o mesmo deslocamento da estrutura sandwich. Deste modo, garantiu-se a mesma rigidez para ambas as placas. Exemplificando, foi aplicada uma força estática na extremidade oposta ao encastramento, tal como no exemplo anterior, e foi obtido um deslocamento da estrutura sandwich. De seguida, foi aplicada a mesma força a uma placa de alumínio com iguais condições fronteira, alterando a espessura, de modo a obter o mesmo deslocamento da estrutura sandwich (figura 4.7).

Quanto à simulação numérica para a estrutura sandwich foi usada a malha 3 do caso anterior com os elementos C3D8I. Já a placa em alumínio utiliza 36000 elementos também, C3D8I. A função utilizada no “ABAQUS” foi Static Standard por se tratar de um problema estático.



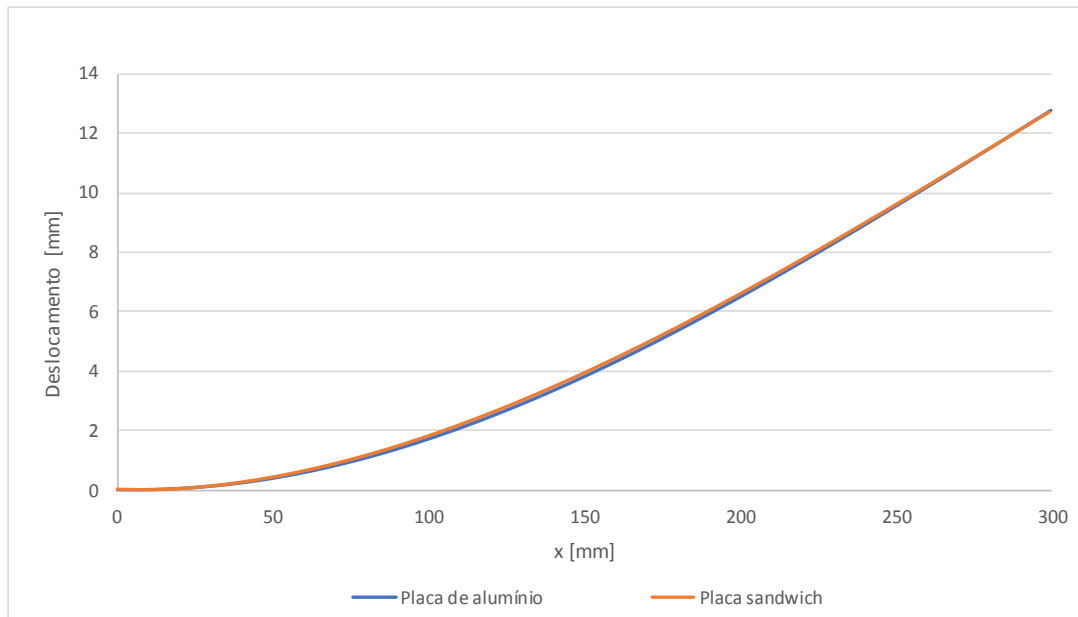


Figura 4.7 - Deslocamentos da placa sandwich e placa de alumínio

Contudo, como podemos ver na figura 4.7, o deslocamento nunca será exatamente igual, uma vez que se trata de um processo iterativo de resultados experimentais que têm sempre um pequeno erro associado e, portanto, nunca será possível obter um deslocamento exatamente igual. Para que a rigidez da placa de alumínio seja aproximada à rigidez da estrutura sandwich em estudo, a placa de alumínio terá cerca de 7,7 mm de espessura. Sucessivamente, calculou-se o peso da placa sandwich e da placa de alumínio, tabela 4.2 e tabela 4.3, respetivamente.

Tabela 4.2 - Cálculo do peso da placa sandwich.

Placa sandwich	Área [m <sup>2</sup> ]	Espessura [m]	Ró [kg/m <sup>3</sup> ]	Peso [kg]
<b>Extremidades</b>	0,06	$2 \times 10^{-3}$	2700	0,324
<b>Núcleo</b>	0,06	$8 \times 10^{-3}$	250	0,12
<b>Peso total</b>				0,444

Tabela 4.3 - Cálculo do peso da placa de alumínio.

Placa de alumínio	Área [m <sup>2</sup> ]	Espessura [m]	Ró [kg/m <sup>3</sup> ]	Peso [kg]
<b>Alumínio</b>	0,06	$7,7 \times 10^{-3}$	2700	1,247

Depois de determinado o valor do peso das duas placas, é perceptível que a placa de alumínio é mais pesada que a estrutura sandwich, ambas com semelhante rigidez. Ainda assim, esta diferença fica realçada quando optamos por analisa-la em percentagem:

$$\frac{1,247 - 0,444}{1,247} * 100 = 64,4\% \quad (4.2)$$

Deste modo, temos uma redução de peso de cerca de 64,4%, se substituirmos uma placa de alumínio por uma placa sandwich com núcleo de espuma metálica. Visto isto, comprova-se a teoria referida anteriormente de que as estruturas sandwich têm elevados rácios de rigidez/peso.

Quer isto dizer que, se por exemplo substituirmos o alumínio de uma carroçaria automóvel por estrutura sandwich com igual rigidez, esta ficaria 64,4% mais leve sem alterar a segurança do condutor. Entre outras vantagens, uma diminuição do peso levaria a menos consumos, o que se traduz numa grande ajuda económica e ambiental.

## Referências

- [1] <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/gsa/default.htm>
- [2] <http://www.stressebook.com/solid-metal-versus-sandwich-panels/>
- [3] <https://www.quora.com/What-is-the-hourglass-effect-in-finite-element-analysis-How-does-the-reduced-integration-resulting-in-the-hourglass-effect-work-How-can-we-counter-the-hourglass-effect>
- [4] Sun, Eric Qiuli, “Shear Locking and Hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS, and ANSYS”
- [5] [http://web.mit.edu/calculix\\_v2.7/CalculiX/ccx\\_2.7/doc/ccx/node28.html](http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node28.html)

## CAPÍTULO 5

### 5 REPRODUÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

#### 5.1 Ensaio UCB

Para determinar o comportamento dinâmico da espuma metálica, efetuou-se um ensaio de flexão cilíndrica UCB (unconstrained cylindrical Bending, Numisheet 2002 Benchmark Problem), visto que estes tipos de ensaios são muito frequentes no estudo de conformação plástica de chapas devido à sua simplicidade geométrica e por induzir a melhores resultados numéricos. Assim, o ensaio UCB consiste em deslocar um punção sobre uma chapa, com os materiais do interesse do utilizador, que está apoiada sobre uma matriz semicilíndrica, ver figura 5.1. O punção tem diâmetro de 50 mm e a matriz semicilíndrica tem um raio de 34 mm e dois raios de concordância de 15 mm. Quanto à placa em análise, trata-se de uma placa sandwich com dimensões  $230 \times 30 \times 10$  mm.

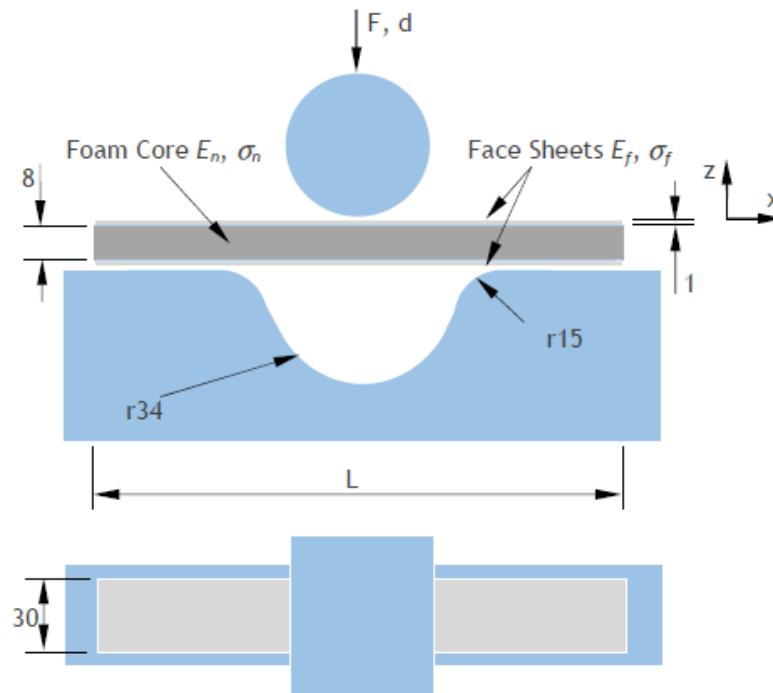


Figura 5.1 - Exemplificação de um ensaio UCB

## 5.Reprodução do Ensaio experimental

Com o intuito de perceber a influência de um impacto dinâmico nas espumas metálicas, o ensaio UCB efetuou-se para diferentes velocidades de descida do punção: 1000, 10000 e 27778 mm/s. Por outro lado, realizou-se um ensaio estático que consiste em impor um deslocamento de 50 mm ao punção, em vez de velocidade. Como é evidente, o punção não atingirá instantaneamente o deslocamento pretendido, mas deslocar-se-á a uma velocidade muito pequena e, por isso, estes ensaios também se designam por quase-estáticos. Os resultados desta simulação servem como base de comparação para os restantes ensaios, uma vez que este foi estudado e comprovado na tese de doutoramento de Mata, Hélder T C, sobre “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformação Constituídas por Núcleo de espumas Metálicas” em 2014.

Tal como no Capítulo 4, todos os ensaios serão feitos apenas numericamente através do software “ABAQUS”. Para os ensaios dinâmicos utilizou-se a função Dynamic Explicit, visto ser a mais indicada para pequenos problemas dinâmicos transientes. Por sua vez, o ensaio quase estático realizou-se na função Static Standard, usual para problemas estáticos e quase estáticos, como é o caso.

Devido à simplicidade geométrica do provete foi possível utilizar planos de simetria, diminuindo o tempo de processamento, uma vez que é possível representar apenas  $\frac{1}{4}$  do provete original, aplicando as devidas condições de fronteira. O punção e a matriz semicilíndrica são modelados como superfícies rígidas.

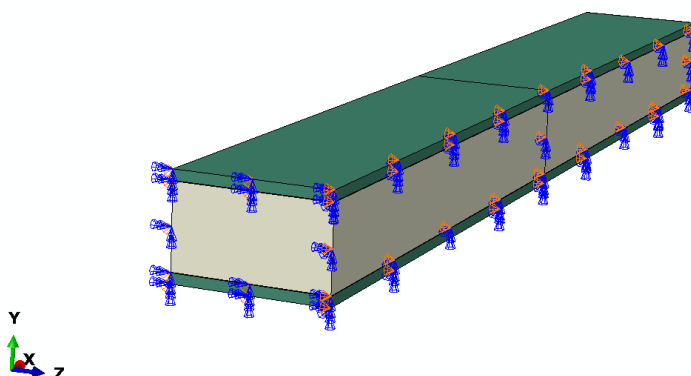
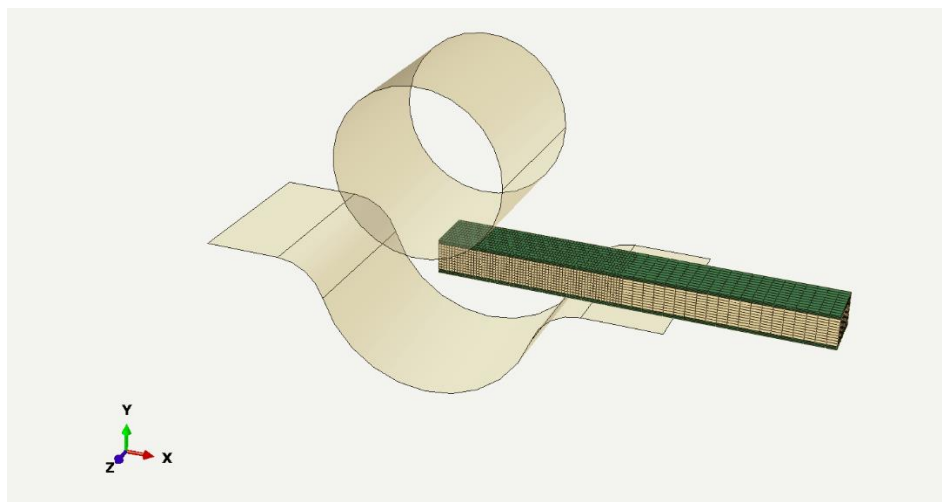


Figura 5.2 - Representação das condições fronteira.

Posteriormente, é necessário criar a malha e definir o tipo de elementos a ser utilizados pelo “ABAQUS” para a determinação do comportamento da placa sandwich. Para reduzir o tempo de processamento e a exigência computacional a malha estará dividida em duas partes: a primeira parte vai desde o ponto de contacto entre o provete e o punção até ao contacto entre o provete e a matriz semicilíndrica. Aqui, a malha é um pouco mais refinada, na medida em que se trata da zona onde se direcciona o estudo e onde os gradientes de tensão são maiores; a segunda parte é o que resta do provete, nesta a malha é mais grosseira, uma vez que já se trata de uma zona com pouco interesse de análise.



*Figura 5.3 - Configuração do ensaio UCB e representação da malha*

No conjunto das duas malhas obtemos: para as chapas de alumínio, das extremidades, cerca de 2580 elementos C3D8I, enquanto para as espumas de alumínio, que faz parte do núcleo, serão utilizados 8600 elementos C3D8. São ainda utilizados cerca de 1720 elementos COH3D8, divididos em duas camadas. Os elementos COH3D8 são elementos coesivos com cerca de 0,06 mm de espessura, situados entre o núcleo e as extremidades da estrutura sandwich (ver figura 5.3), e representam numericamente o adesivo. O adesivo tem uma função determinante na estabilidade estrutural da sandwich, visto que é este componente que estabelece a ligação entre as chapas de alumínio e a espuma metálica e pode ter um papel preponderante no desmembramento da estrutura.

## 5.Reprodução do Ensaio experimental

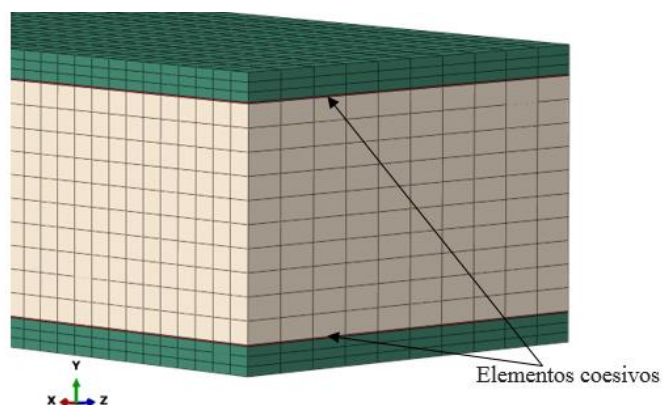


Figura 5.4 - Demonstração dos elementos coesivos.

Para as chapas das faces foi assumido um comportamento elastoplástico isotrópico com as propriedades definidas no capítulo 3. Já para o núcleo foi assumido um comportamento elastoplástico, sendo a parte plástica da espuma modelada com o modelo constitutivo de Deshpande, anteriormente apresentado. As propriedades elásticas e plásticas utilizadas foram, mais uma vez, as utilizadas no capítulo 3. Por sua vez, os elementos coesivos têm as propriedades definidas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos elementos coesivos

<b>Elastic properties</b>	<b>E/Enn</b>	85	
	<b>G1/Ett</b>	85	
	<b>G2/Ett</b>	85	
<b>Damage Initiation</b>	<b>Nominal Stress Normal mode</b>	5	
	<b>Nominal Stress First Direction</b>	1,087	
	<b>Nominal Stress Second Direction</b>	1,087	
<b>Damage Evalution</b>	<b>Displacement At Failure [mm]</b>	0,42	6
	<b>Mode Mix Ratio</b>	0	1
	<b>Mode Mix Ratio for 3D</b>	0	1

Estas propriedades foram retiradas da dissertação, para grau de mestre de SeifAllah Hassan Mahmoud Sadek, “Aluminum foam sandwich with adhesive bonding: computational modelling”, em 2016.

Contudo, nos ensaios dinâmicos, não é possível a introdução dos coeficientes “Mode Mix Ratio” e “Mode Mix Ratio for 3D”, devido a problemas do “ABAQUS”. Deste modo, para os ensaios dinâmicos utilizaremos os coeficientes da tabela 5.1, que não estão sombreados. A figura 5.6, que mostra a curva de força em função do deslocamento do punção para dois ensaios UCB estáticos em que um utiliza as características gerais do adesivo (Teste 1) e o outro as características utilizadas nos ensaios dinâmicos (Teste 2).

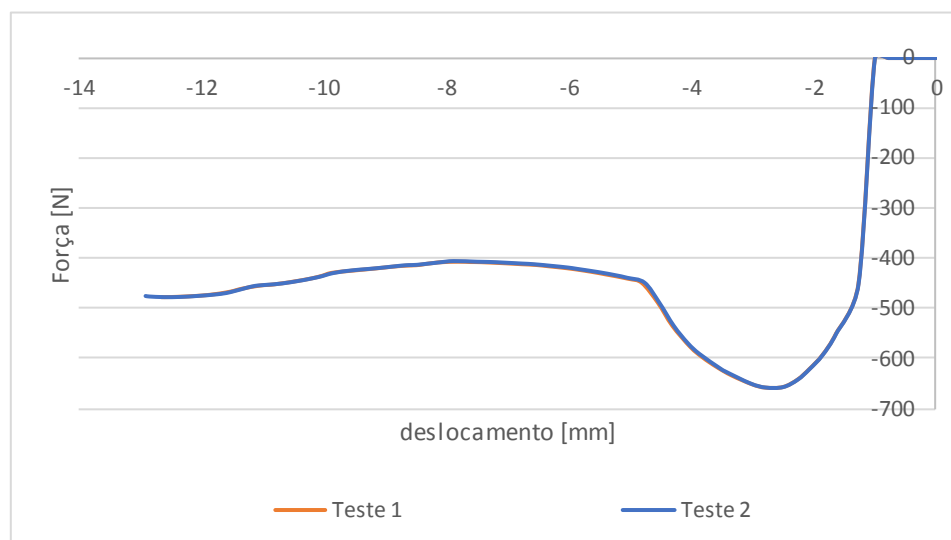


Figura 5.5 - Comparação das propriedades do adesivo.

Pela observação da figura 5.5, percebe-se que os coeficientes que não podem ser utilizados na função “Dynamic Explicit” não têm influência nos resultados do estudo em foco.

### 5.2 Resultados

Como foi referido anteriormente, a validação dos resultados das simulações numéricas é feita através da comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente, para o caso estático.

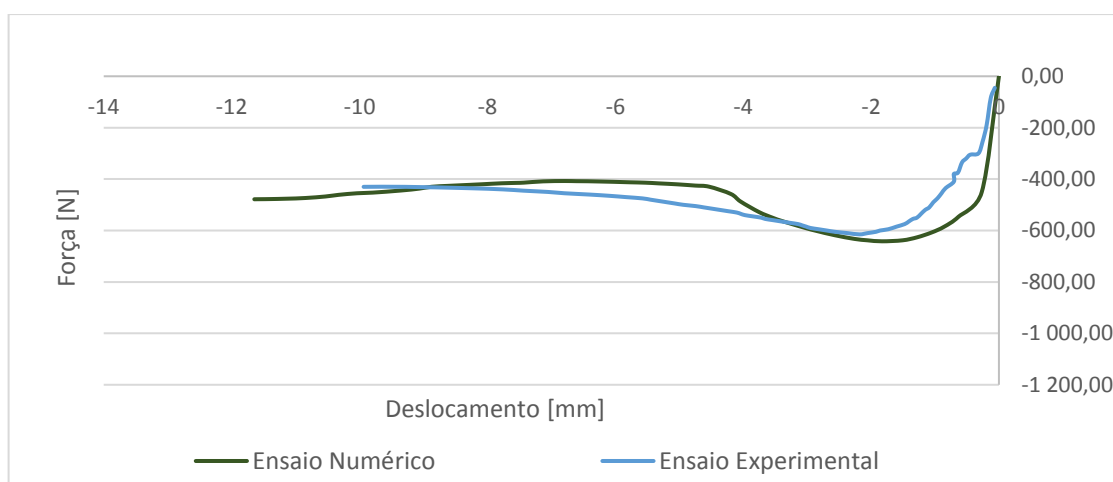


Figura 5.6 - Comparação dos resultados numéricos com os experimentais [1].

Analisando a figura 5.6 verificamos que, embora não sendo exatamente iguais os resultados numéricos são uma boa aproximação dos resultados experimentais.

O ensaio estático é apenas determinado até cerca de 12 mm de descida do punção, devido ao programa “ABAQUS” não conseguir divergir a solução para concluir o ensaio.

Posteriormente, e para analisar o comportamento da placa sandwich são apresentados gráficos de força de reação da estrutura sandwich, em função do deslocamento do punção. Este gráfico permite-nos observar a rigidez do provete, bem como a sua reação às várias solicitações a que estão sujeitas.



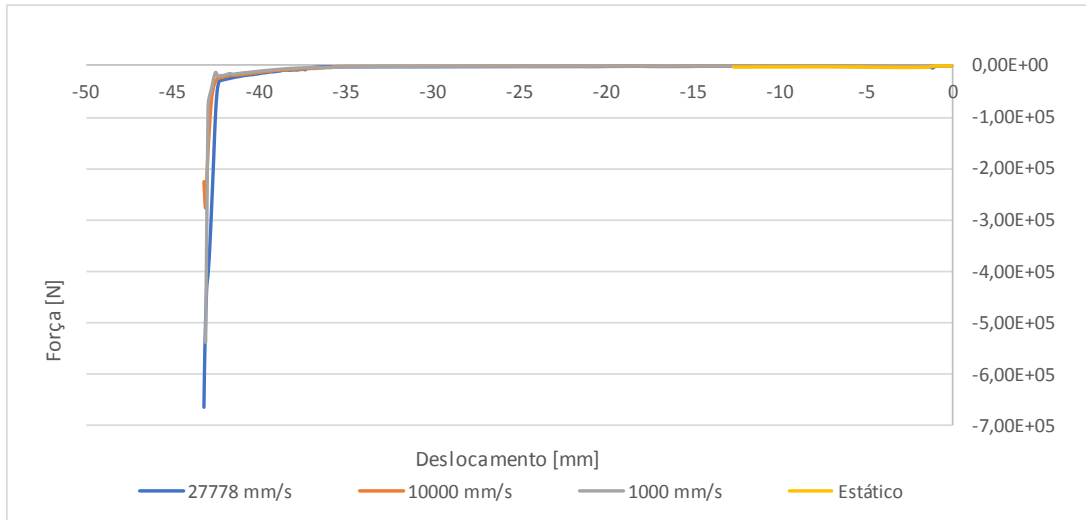


Figura 5.7 - Resultados do ensaio UCB.

Como podemos verificar na figura 5.7, a força é maior quando a espuma está quase totalmente esmagada. Para que a velocidade do punção se mantenha, é necessária uma força bastante maior relativamente ao restante ensaio. De referir também, que nesse período a estrutura sandwich já tem um comportamento de um corpo homogêneo, uma vez que a força aumenta de forma linear para que seja possível o punção avançar.

Para que se possa analisar o que ocorre ao longo do ensaio, é então necessário desprezar a parte final do mesmo, em que os valores da força exercidos são bastante elevados. Assim, na figura 5.8 é demonstrado apenas o ensaio até cerca de 35mm de descida do punção.

## 5.Reprodução do Ensaio experimental

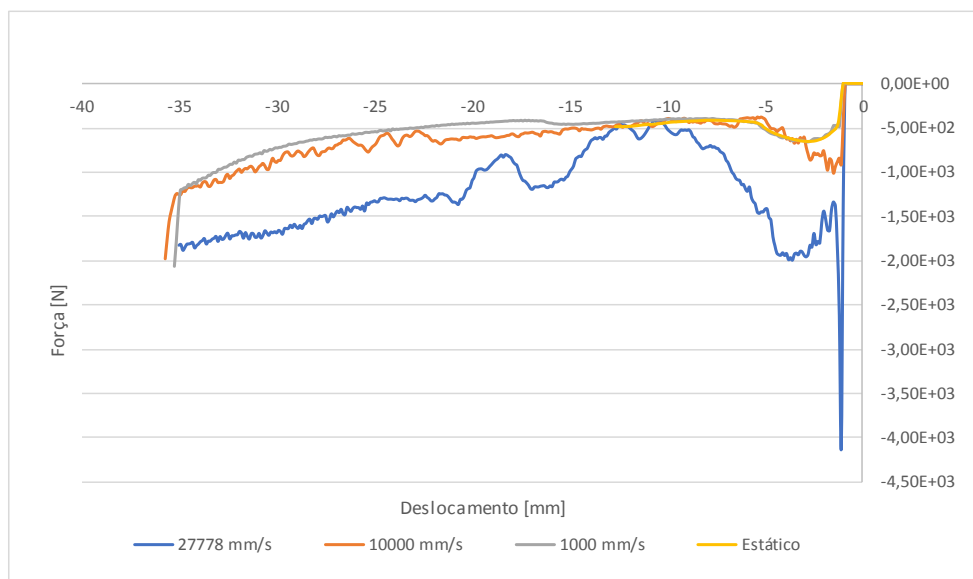


Figura 5.8 - Resultados do ensaio UCB desprezando a parte final.

Pela análise da figura 5.8, observamos que para todos os ensaios o comportamento da estrutura sandwich é semelhante e que existe um aumento significativo da força no impacto (fase elástica). Na fase plástica, há uma diminuição acentuada da força que ao estabilizar fica com uma ligeira inclinação crescente. Na parte final, a força sobe de forma extremamente acentuada devido ao facto de o corpo já ter um comportamento homogéneo, como já foi referido anteriormente.

No entanto, é visível que para a velocidade de 27778 mm/s o comportamento é mais instável, visto que existe uma forte oscilação da força do punção, quando este desce entre os 5 e os 15mm. Esta oscilação deve-se à conjugação da elevada velocidade e início da descolagem entre o núcleo e as faces.

De referir também, que com o aumento da velocidade, a zona de plasticidade aumenta. Assim, haverá também, uma maior capacidade de absorção de energia por parte do material, na deformação plástica. No entanto, na figura 5.9 podemos observar melhor a absorção de energia em função do deslocamento do punção. Como foi referido anteriormente, a espuma tem grande capacidade de absorção de energia, quando deformada plasticamente, no entanto esta capacidade começa a diminuir quando esta está demasiadamente deformada passando a comportar-se como um material homogéneo. Assim, o gráfico da figura 5.9 apresentará a absorção de energia até cerca de 33mm de

descida do punção, que é quando a espuma de alumínio se começa a comportar como um material homogêneo.

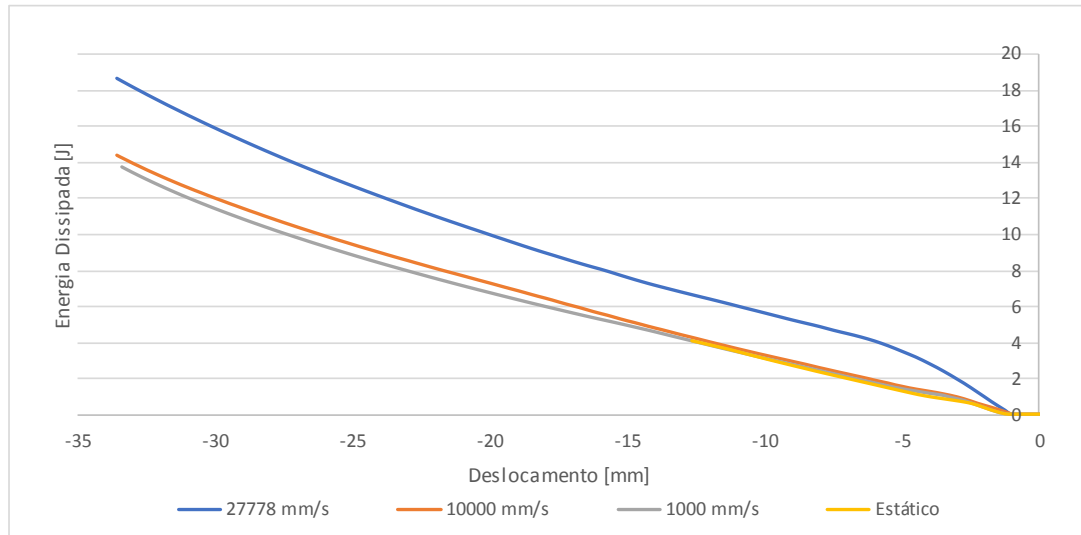


Figura 5.9 - Gráfico de absorção de energia na deformação plástica da espuma em função da descida do punção.

Concluimos que para velocidades reduzidas o valor da energia absorvida é praticamente constante, uma vez que o ensaio quase estático e com uma velocidade de 1000 mm/s são bastante semelhantes. Isto indica que existe um patamar de velocidade, em que até ser atingida o comportamento da espuma e a energia absorvida é semelhante. Contudo, para grandes velocidades como 27778 mm/s (cerca de 100km/h), a energia absorvida sofre um aumento significativo tal como já se referiu anteriormente. Neste sentido, concluimos que depois de um nível em que o comportamento é semelhante, a estrutura tende a absorver mais energia quanto maior a velocidade de impacto.

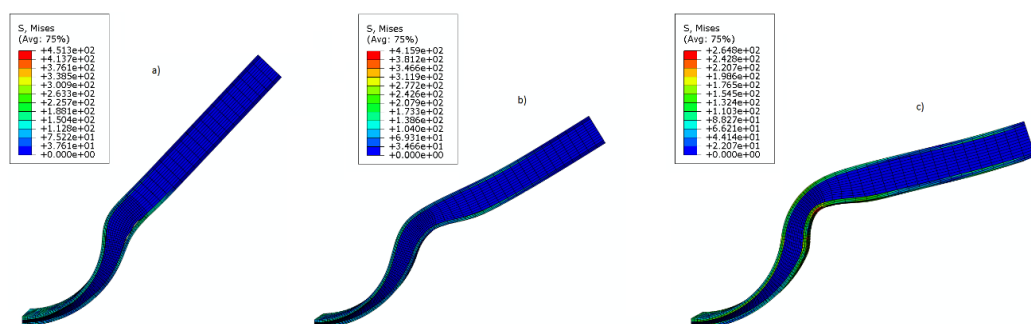


Figura 5.10- Solução do ensaio UCB, a) 1000 mm/s, b) 10000 mm/s, c) 27778 mm/s

Pela observação da figura 5.10, reparamos que a maior velocidade testada (27778 mm/s) existe a criação de uma espécie de uma bossa na zona de contacto com a matriz semicilíndrica. Muito interessante também, é o facto que se analisarmos o ponto do provete mais afastado da zona de contacto, o caso em que ele tem um menor deslocamento é para velocidades mais elevadas. Isto pode dever-se ao facto que para maiores velocidades a estrutura sandwich tende a ter capacidade para absorver mais energia.

A conclusão que podemos retirar deste ensaio é que as espumas metálicas tendem a absorver mais energia quanto maior for o impacto. Isto significa que, para um impacto a grande velocidade a espuma absorve mais energia e apresenta uma maior força de reação que para impactos de menor velocidade. Por outro lado, quanto maior a velocidade de impacto, maior a alteração da forma final do provete. Isto deve-se, mais uma vez, ao facto que para maiores velocidades de impacto, a estrutura sandwich absorve mais energia.

Estes resultados são bastante motivadores para a indústria dos transportes, uma vez que as espumas metálicas podem ser um aliado muito importante no combate à minimização do número de vítimas em acidentes rodoviários.

## Referências

- [1] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformação Constituídas por Núcleo de espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP,2014,Porto
- [2] Guedes, Sérgio André Remalho, “Influência da espessura do núcleo no comportamento mecânico de estruturas sandwich com núcleo em espuma metálica”, Tese de Mestrado, FEUP, 2017, Porto

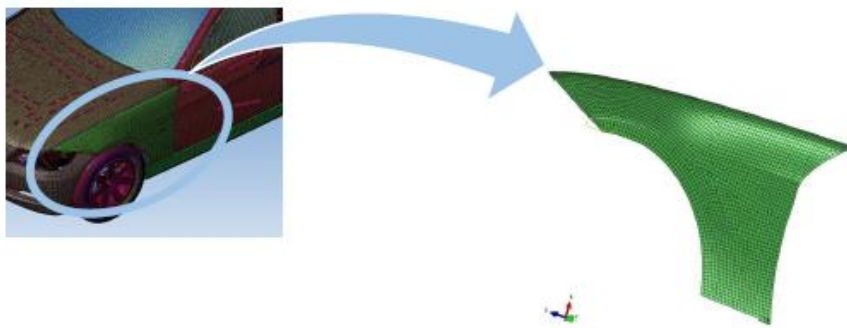
## **CAPÍTULO 6**

### **6 APLICAÇÃO DA ESTRUTURA SANDWICH A UM COMPONENTE AUTOMÓVEL**

Neste capítulo será utilizado um componente automóvel e aplicar-se-lhe-á o formato de uma estrutura sandwich (1 mm de faces em alumínio e 8mm de núcleo em espumas de alumínio). Posteriormente, efetuou-se um estudo sobre a variação do comportamento para diferentes impactos. Por fim, analisar-se-á, mais uma vez, a diferença de peso entre as estruturas homogêneas de aço, e uma estrutura sandwich, como a que tem servido de estudo para a presente dissertação, mantendo a rigidez da estrutura.

#### **6.1 Estrutura sandwich na lateral de um automóvel**

A parte do automóvel utilizada neste capítulo é um painel lateral da parte frontal do veículo (ver figura 6.1). Este painel selecionado é definido como sendo a forma final que se pretendia obter. Essa forma final é já obtida como uma malha de elementos finitos.

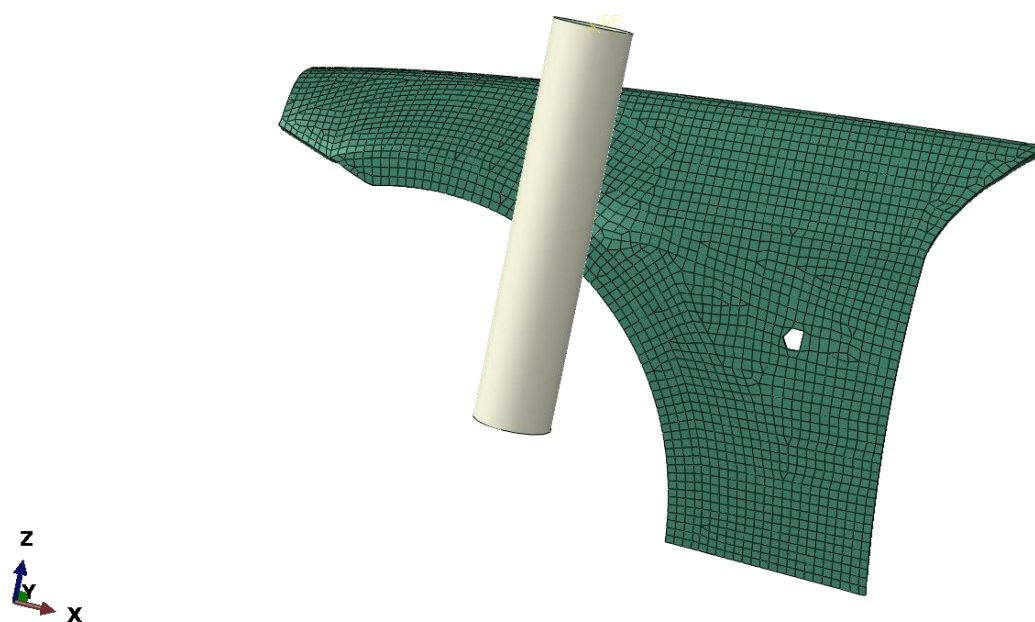


*Figura 6.1 - Zona do carro selecionada [3].*

## 6. Aplicação da estrutura sandwich a um componente automóvel

Depois de obtida a forma da zona lateral de um automóvel, são realizados os ensaios que consistem em criar um impacto de um cilindro sobre a lateral do veículo (figura 6.2). Inicialmente, realizar-se-á um ensaio quase-estático em que se irá impor um deslocamento de 150mm ao punção. Sucessivamente, serão efetuados ensaios dinâmicos com as mesmas velocidades de punção do capítulo 5 (1000 mm/s, 10000 mm/s e 27778 mm/s).

Mais uma vez, as simulações numéricas serão realizadas no software “ABAQUS” e utilizar-se-á a função Static Standard para o ensaio quase-estático e a função Dynamic Explicit para os ensaios em que são aplicadas velocidades ao punção. No que diz respeito às propriedades elásticas e plásticas, que caracterizam a espuma metálica e o alumínio, são, mais uma vez, as referidas no capítulo 3.

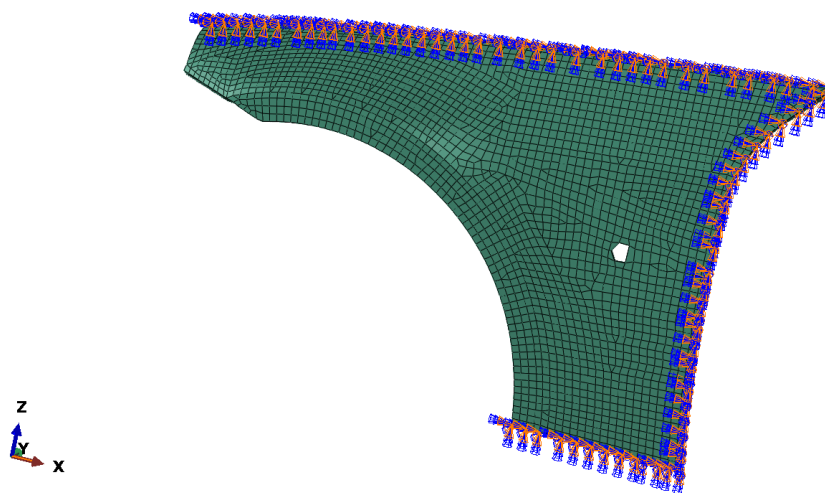


*Figura 6.2 – Exemplificação do impacto a provocar na lateral.*

Em termos de malha utilizada, para a análise da lateral em sandwich são empregados no núcleo, cerca de 19864 elementos C3D8R e 544 elementos do tipo C3D6 (elementos hexaédricos de 6 nós), dando um total de 23193 nós, na discretização das espumas de alumínio. Para as chapas das faces são aplicados 9660 elementos C3D8R e 272 C3D6,

contabilizando um total de 15462 nós. O cilindro está desenhado como um corpo rígido, dispensando assim qualquer tipo de malha.

As condições fronteira devem representar o que acontece à parte lateral quando aplicado num veículo. A lateral é aparafusada à carroçaria do automóvel, deste modo numericamente o aparafusamento é aproximado ao encastramento, não permitindo qualquer movimento nas faces encastradas, ver figura 6.4.



*Figura 6.3 - Condições fronteira da lateral.*

De realçar que nestes ensaios, por questões poupança computacional, não é considerado a função do adesivo, sendo que neste caso o núcleo e as faces estão com partilha de nós, o que significa que esta ignora qualquer possibilidade de descolagem do núcleo. Este facto não é coerente com a realidade, no entanto para o estudo em questão é uma aproximação razoável.

Para perceber agora o comportamento da lateral, iremos mostrar os gráficos da força em função do deslocamento do punção obtidos nos respetivos ensaios.

## 6. Aplicação da estrutura sandwich a um componente automóvel

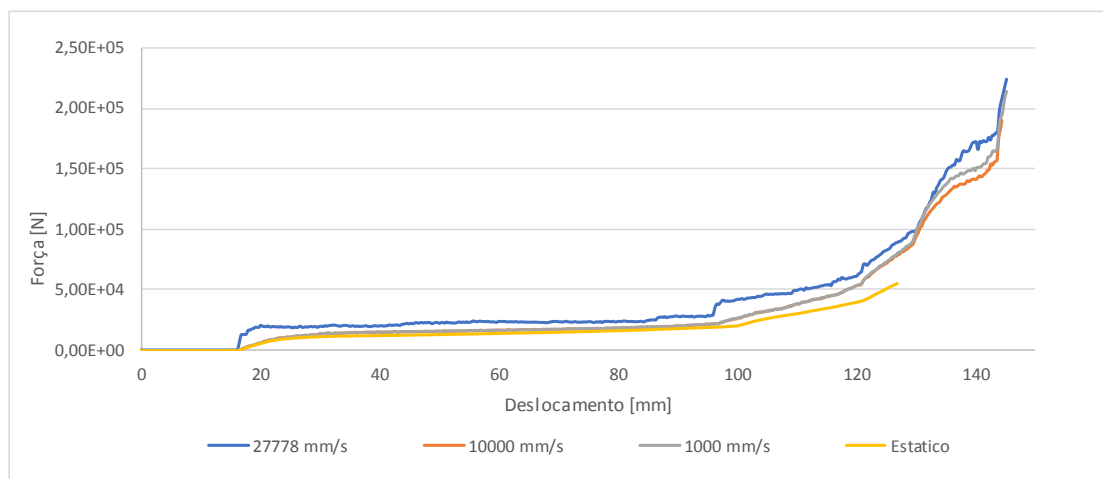


Figura 6.4 - Gráfico força versus deslocamento provocado pelo impacto do punção.

Pela observação dos resultados obtidos, verificamos, mais uma vez, que para velocidades elevadas a parte elástica tem valores de força maiores, aumentando assim a energia absorvida. O que quer dizer que, a placa tem também uma maior reação ao impacto com o cilindro para velocidades mais elevadas.

De notar que, pela proximidade das curvas das velocidades mais baixas e do caso quase estático, o comportamento de impacto a baixas velocidades é muito semelhante, sendo que a energia absorvida não deve variar muito.

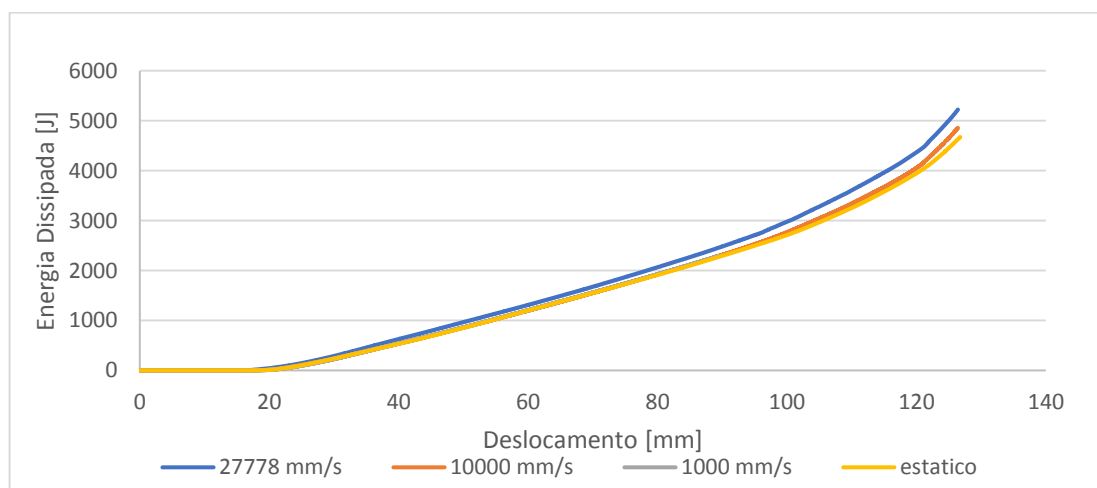


Figura 6.5 - Energia absorvida pela lateral do automóvel.



Mais uma vez, o gráfico da figura 6.5 apresenta o consumo de energia para deformação plástica, apenas enquanto a estrutura metálica não se comporta como um material homogéneo.

A figura 6.5 vem confirmar o que já tinha sido mencionado. Contudo, atenta-se que a diferença de energia absorvida aumenta à medida que a velocidade de descida do punção aumenta. Isto indica que para fortes impactos sobre estrutura sandwich, esta tende a responder melhor e a absorver mais energia.

Os resultados obtidos no ensaio da lateral vêm reforçar o que foi observado no ensaio UCB. Embora, é de notar que a diferença da energia absorvida e do diagrama de força versus deslocamento entre as diferentes velocidades não é tao acentuado no caso da lateral. Isto ocorre devido ao facto de alterar a geometria do objeto em estudo, tendo este outro tipo de resposta provocado pelo tipo de geometria.

Em termos de dano da lateral podemos ver na figura 6.5, como esta fica após o choque com o cilindro. A forma final da lateral é bastante semelhante em todos os ensaios, todavia será apenas apresentada a forma de um ensaio.

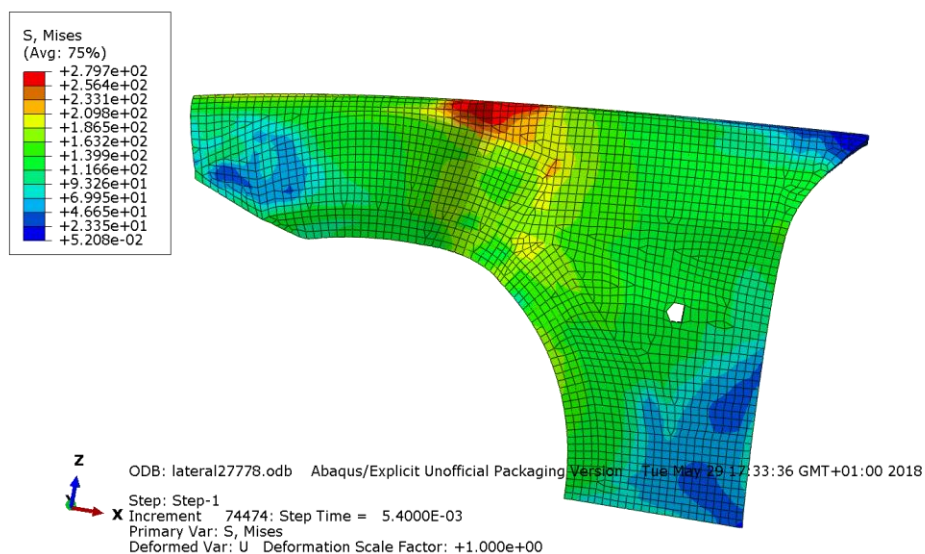


Figura 6.6 - Forma da lateral após o choque.

Pela análise da figura 6.6 verificamos que a lateral ganha uma forma cilíndrica na zona de impacto, devendo-se à boa capacidade de deformar e absorver energia que faz com que a área afetada se danifique com maior intensidade e as outras zonas da lateral permaneçam sem grande alteração.

## 6.2 Diferença do rácio de rigidez/peso entre a estrutura sandwich e o aço

Para concluir o estudo da lateral seria conveniente perceber qual a diferença de peso de uma lateral em estrutura sandwich com uma em aço (material normalmente utilizado para construção deste componente), com a mesma rigidez.

Devido à complexidade geométrica da lateral é mais difícil calcular o peso desta como foi feito anteriormente no capítulo 4, por isso neste caso, o peso será calculado pelo “ABAQUS”. Este pela forma e propriedade dos elementos consegue calcular o peso da estrutura. Assim e como foi simulado anteriormente a lateral em sandwich pesa cerca de 2,39 kg.

Posteriormente, para igualar a rigidez da lateral em aço é necessário igualar o diagrama de força versus rigidez. Pela equação (4.1), se igualarmos o deslocamento de um certo corpo quando aplicamos a mesma força, obtemos uma rigidez semelhante. Assim, iterativamente, é determinada a espessura que a lateral em aço tem que obter para ter uma rigidez semelhante à chapa de alumínio.

Para a simulação numérica na estrutura em aço foram utilizados cerca de 2486 elementos e cerca de 2584 nós. Estes elementos são elementos do tipo “Shell”, uma vez que foi com este tipo de elementos que se conseguiu modelar a forma da lateral. As condições fronteira são as mesmas do caso anterior, ver figura 6.3.

As propriedades elásticas do aço, que tem uma densidade de  $7870 \text{ kg/m}^3$ , utilizadas nesta simulação são fornecidas pelo fabricante (tabela 6.1).

*Tabela 6.1 - Propriedades plásticas do aço SAE 1020 [3].*

<b>E [GPa]</b>	<b>Coefficiente Poisson</b>
<b>205</b>	<b>0.3</b>

Os pontos de tensão-deformação que definem a parte plástica foram obtidos experimentalmente no ensaio de tração. Na figura 6.7 está representado o domínio plástico. Os pontos representados são suficientes para a caracterização plástica do aço para o trabalho em questão, dispensando assim recorrer à lei de Voce.

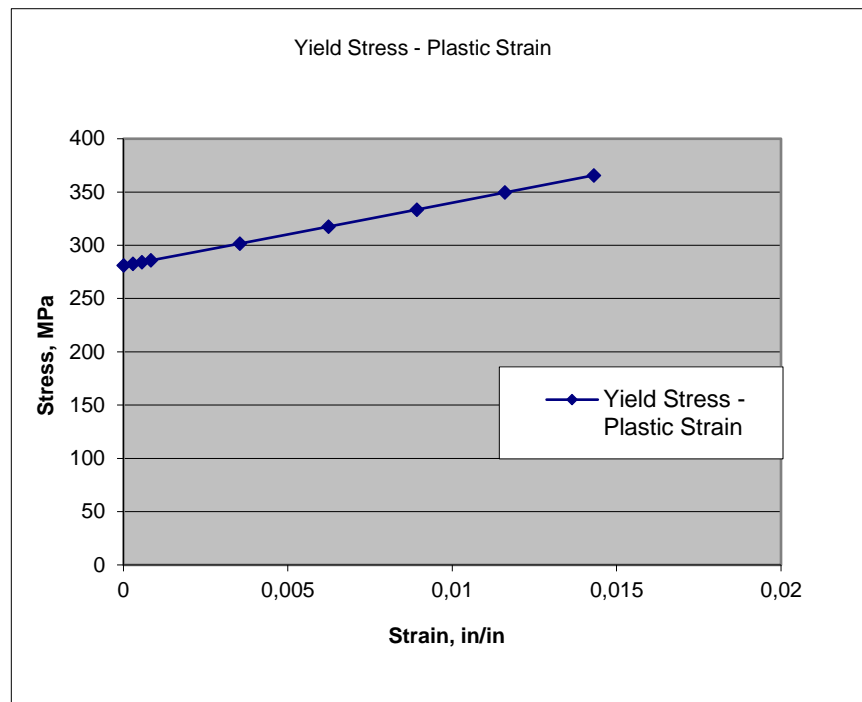


Figura 6.7 - Pontos tensão real-deformação real [4].

O ensaio realizado foi um ensaio estático ou quase estático, que consiste em obrigar o punção a deslocar 125mm no sentido da lateral, tal como no caso anterior. Para tal é usada a função Static Standard do “ABAQUS”, como tem sido recorrente para este tipo de ensaio nesta dissertação.

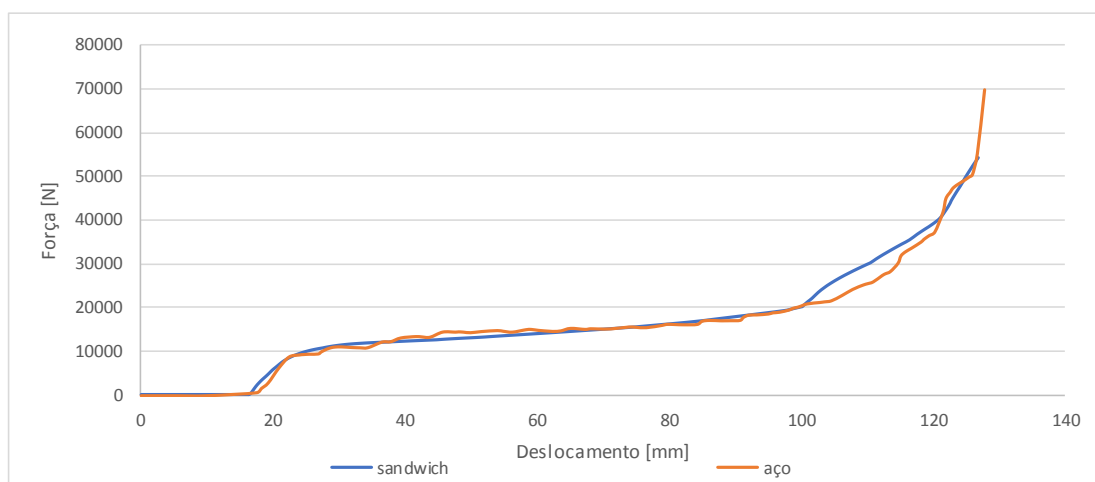


Figura 6.8 – Gráfico de força versus deslocamento da lateral em sandwich e em aço.

Assim como podemos ver na figura 6.8, a rigidez semelhante entre as duas laterais obtém-se para uma lateral em aço com cerca de 3.2 mm de espessura. Com isto, obtém-se um peso de 8,25 kg. Se compararmos a diferença de peso obtemos:

$$\frac{8,25 - 2,39}{8,25} \times 100 = 71\% \quad (6.1)$$

Desta forma, concluímos, mais uma vez, que as espumas para além da grande capacidade que têm de absorver energia, apresentam um rácio de peso/rigidez bastante elevado.

## Referências

- [1] <http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>
- [2] <http://imechanica.org/files/steel%20properties.xls>
- [3] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformação Constituídas por Núcleo de espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto

## **7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Os principais objetivos desta tese têm em vista analisar o comportamento dinâmico de estruturas constituídas por espumas metálicas. As simulações numéricas efetuadas permitiram estabelecer linhas de investigação, no sentido de responder ao objetivo desta tese.

As espumas sandwich têm um elevado rácio de rigidez/peso e uma grande capacidade de absorção de energia quando deformadas plasticamente. Estas características são muito relevantes se o material conseguir manter a sua eficiência em impactos dinâmicos. Este material pode ser muito útil na indústria automóvel, uma vez que para além, de baixar bastante o peso dos veículos, podem ter um papel fundamental na redução de vítimas mortais provenientes de acidentes rodoviários.

### **7.1 Conclusões**

No decorrer da realização da presente dissertação, foi possível verificar algumas conclusões. Destas conclusões retirou-se que os constituintes das espumas sandwiches são responsáveis por determinadas propriedades da estrutura, apresentando esta um comportamento próprio. Estes tipos de estruturas são constituídas pelas faces, núcleo e adesivo.

Neste sentido, as faces têm como principal finalidade garantir resistência à flexão da estrutura sandwich devido ao facto de uma das faces se encontrar em tração e a respetiva face oposta à compressão. O comportamento mecânico das faces é influenciada pela distância entre as faces, espessura, orientação dos grãos da chapa (iso/anisotropia) e pelo tipo de material. Embora, não seja o foco principal desta tese concluimos, no capítulo 2, que com o aumento da distância entre as faces, aumenta o momento de inércia e, consequentemente, a resistência.

Relativamente ao adesivo, este é referido ao longo desta dissertação e utilizado nas simulações numéricas do ensaio UCB (capítulo 5). O adesivo é uma parte constituinte da estrutura que é fundamental para a absorção de tensões de corte quando o painel é flexionado, assim como é essencial para a integridade da mesma. Para esta, assume principal relevância a escolha adequada do adesivo, tal como para a seleção deste é importante ter em atenção os materiais a colar, gamas de temperaturas de serviço e a necessidade de conformar ou não a estrutura plasticamente. Nesta dissertação apenas compensou esforço computacional de colocar o adesivo, no capítulo 5, uma vez que aí foi estudado a conformação plástica da estrutura sandwich quando sujeita a impactos dinâmicos e uma possível descolagem das faces ao núcleo poderia por em causa a veracidade dos resultados obtidos.

Finalmente, o núcleo é responsável pela baixa densidade da estrutura sandwich, bem como pela absorção das tensões de corte provenientes da deformação da estrutura. Estas propriedades podem diferir conforme a seleção dos materiais, escolhendo os mais adequados para o caso em concreto. Neste caso, a espuma metálica é caracterizada por ser um material com elevada capacidade de absorção de energia e vibrações, bom isolador térmico e sonoro, sendo um material bastante utilizado na indústria de transportes (eficiência sonora, térmica e energética e motivos de segurança). O estudo desta exposição recai sobre o comportamento do núcleo quando submetido a um impacto dinâmico.

Concluímos, após a análise dos resultados obtidos, que uma estrutura sandwich com núcleo de espuma metálica absorve mais energia e oferece uma maior resistência mecânica quanto maior for a velocidade do impacto. Contudo, existe uma velocidade, que até ser alcançada, o comportamento da estrutura é sempre semelhante. Isto verificou-se, uma vez que a energia absorvida num ensaio quase estático é muito semelhante à de um ensaio com uma velocidade de impacto de 1000 mm/s (velocidade considerável neste tipo de ensaios). Além disso, foi verificado que uma chapa de estrutura sandwich pesa menos cerca de 64% que uma chapa de alumínio com a mesma rigidez. Por outro lado, um corpo composto por estrutura sandwich pesa menos aproximadamente 71% que esse mesmo corpo em aço com a mesma rigidez. Isto vem comprovar que estas estruturas têm uma elevada razão de rigidez/peso. Podemos concluir que este tipo de estrutura tem elevados desempenhos quando solicitados por impactos dinâmicos. Este aspeto demonstra a grande capacidade que estas estruturas têm para absorver energia, daí poder ganhar um impacto

fundamental na indústria dos transportes com vista a minimizar as vítimas dos acidentes rodoviários.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Após a análise do comportamento das estruturas sandwich quando solicitadas com um impacto dinâmico, através de simulações computacionais, seria interessante a realização de um trabalho de modo a perceber a influência da espessura do núcleo nos impactos dinâmicos.

Para além do referido, um trabalho que seria bom complemento ao realizado nesta dissertação, seria comparar os resultados obtidos nas simulações computacionais aqui efetuados com os mesmos ensaios, mas feitos experimentalmente.

Por fim, outra linha de investigação seria aplicar as estruturas sandwiches a componentes automóveis e, com diferentes tipos de impactos, compreender a energia absorvida por estas estruturas e, também, o impacto proporcionado aos passageiros do veículo automóvel.